

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Henri LACOSTE-TAYAN

Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers

1^{re} THÈSE. — Sur les aimants permanents.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le

, devant la Commission d'examens.

MM. COTTON, *Président.*

E. DARMOIS

PAUTHENIER

Disp. Soutenance

I. M. 16 Sept. 1939

Examineurs.

PARIS

JOUVE & C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1939

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Henri LACOSTE-TAYAN

Ingenieur du Conservatoire National des Arts et Métiers

1^{re} THÈSE. — Sur les aimants permanents.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le , devant la Commission d'examens.

MM. COTTON, *Président.*

E. DARMOIS
PAUTHENIER } *Examineurs.*

PARIS

JOUVE & C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1939

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen G. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe

<i>Professeurs honoraire</i>	H. LEBESGUE.	LESPIEAU.	Ch. FABRY.
	Emile PICARD.	MARCHIS.	Léon BERTRAND.
	Léon BRILLOUIN.	VESSIOT.	WINTREBERT.
	GUILLET.	PORTIER.	DUBOSCQ.
	PÉCHARD.	MOLLIARD.	BOHN.
	FREUNDLER.	LAPICQUE.	RABAUD.
	AUGER.	G. BERTRAND.	
	DANGEARD.	ABRAHAM.	

PROFESSEURS

M. CAULLERY . . . T	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	H. BÉGHIN . . . T	Mécanique physique et expérimentale.
Emile BOREL . . . T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Jean PERRIN . . . T	Chimie physique.	PAUTHENIER . . .	Physique (P. C. B.).
E. CARTAN T	Géométrie supérieure.	De BROGLIE . . . T	Théories physiques.
A. COTTON T	Recherches physiques.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
J. DRACH T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	P. JOB	Chimie générale.
Charles PÉREZ . . . T	Zoologie.	LABROUSTE . . .	Physique du Globe.
M. GUICHARD . . . T	Analyse et mesures chimiques.	PRENANT T	Anatomie et histologie comparées.
Paul MONTEL . . . T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	VILLEY	Mécanique physique et expérimentale.
L. BLARINGHEM . T	Botanique.	COMBES T	Physiologie végétale.
G. JULIA T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	GARNIER T	Mathématiques générales.
C. MAUGUIN T	Minéralogie.	PÉRÈS	Mécanique théorique des fluides.
A. MICHEL-LÉVY . T	Pétrographie.	HACKSPILL T	Chimie minérale.
N	Mécanique expérimentale des fluides.	LAUGIER T	Physiologie générale.
A. DENJOY T	Application de l'analyse à la Géométrie.	TOUSSAINT	Technique Aéronautique.
L. LUTAUD T	Géographie physique et Géologie dynamique.	M. CURIE	Physique (P. C. B.).
Eugène BLOCH . . T	Physique.	G. RIBAUD T	Hautes températures.
G. BRUHAT T	Physique théorique et Physique céleste.	CHAZY T	Mécanique rationnelle.
E. DARMOIS . . . T	Enseignement de Physique.	GAULT	Chimie (P. C. B.).
A. DEBIERNE . . . T	Physique générale et Radioactivité.	CROZE	Recherches physiques.
A. DUFOUR T	Physique (P. C. B.).	DUPONT T	Théories chimiques
L. DUNOYER	Optique appliquée.	LANQUINE T	Géologie structurale et Géologie appliquée.
A. GUILLIERMOND . T	Botanique.	VALIRON	Mathématiques générales.
M. JAVILLIER . . . T	Chimie biologique.	BARRABÉ	Géologie structurale et géologie appliquée.
ROBERT-LÉVY . . . T	Physiologie comparée.	MILLOT	Biologie animale (P. C. B.).
F. PICARD	Zoologie (Evolution des êtres organisés).	F. PERRIN	Théories physiques.
Henri VILLAT . . . T	Mécanique des fluides et applications.	VAVON	Chimie organique.
Ch. JACOB T	Géologie.	G. DARMOIS . . .	Calcul des Probabilités et Physique mathématique.
P. PASCAL T	Chimie générale.	CHATTON T	Biologie maritime.
M. FRÉCHET T	Calcul différentiel et Calcul intégral.	AUBEL	Chimie biologique.
E. ESCLANGON . . . T	Astronomie.	J. BOUNCART . . .	Géographie physique et Géologie dynamique.
M ^{me} RAMART-LUCAS . T	Chimie organique.	M ^{me} JOLIO-CURIE .	Physique générale et Radio-activité.
		PLANTEFOL	Biologie végétale (P. C. B.).
		CABANNES	Enseignement de Physique.
		GRASSÉ	Biologie animale (P. C. B.).
		PRÉVOST	Chimie (P. C. B.).
		BOULIGAND	Mathématiques.
		CHAUDRON	Chimie (P. C. B.).

Secrétaire A. PACAUD.
Secrétaire honoraire . . . D. TOMBECK.



Cette étude a été effectuée au Laboratoire des Recherches Physiques, sous la direction de Monsieur le Professeur A. COTTON. Nous sommes heureux de lui exprimer ici notre respectueuse et profonde reconnaissance, pour l'accueil si cordial qu'il nous a réservé dans son laboratoire et pour l'inoubliable bienveillance, avec laquelle il a guidé nos débuts dans la recherche scientifique.

Nous sommes également heureux de remercier Monsieur R. V. PICOU de l'intérêt qu'il a témoigné à notre travail, ne cessant de nous prodiguer les conseils et les encouragements qui nous ont permis de poursuivre cette étude. Nous sommes aussi reconnaissants, à nos Professeurs du Conservatoire National des Arts et Métiers : Messieurs LEFRANC et COURNOT, à Monsieur l'Ingénieur militaire en chef de 1^{re} classe, NICOLAU et à Monsieur André MICHEL de leur bienveillante sympathie.

A LA MÉMOIRE DE MON CHER PÈRE

SUR LES AIMANTS PERMANENTS

CHAPITRE I

1. L'acier à aimant. — L'état magnétique d'un aimant, parfaitement aimanté et stabilisé, est entièrement déterminé à chaque instant par les conditions de la partie extérieure du circuit magnétique dont il fait partie. Il est figurable par un point toujours situé dans le quadrant des champs négatifs et des aimantations positives, et à l'intérieur de la courbe obtenue en passant de la saturation positive à la saturation négative (Branche supérieure du cycle d'hystérèse du métal) (Fig. 1).

Lorsque l'aimant est employé sans armature, son aimantation résiduelle ne dépend que de la perméance aérienne, et le point figuratif se trouve sur la courbe même, en P_1 par ex. Lorsqu'il est employé armé, c'est-à-dire avec un circuit extérieur complexe, air et fer, le point figuratif de l'état magnétique se trouve sur la branche remontante d'un cycle partiel P_1P_0 . L'armement peut être plus ou moins complet. Un court-circuit parfait ramène ce point en P_0 sur l'axe OA, un armement partiel le laisse quelque part sur la ligne de recul partant du point P_1 , qui définit l'aimantation à circuit ouvert. Si l'armement est périodiquement variable comme dans les magnétos, le point figuratif de $4\pi I$ décrit une boucle auxiliaire fermée dont les limites extrêmes sont pratiquement H résiduel et $H = 0$.

Dans les études industrielles, on admet les deux hypothèses de base suivantes :

1° L'aimantation est uniforme sur toute la longueur de l'aimant. La perméance aérienne, rapport du flux de force à la différence de potentiel magnétique entre les pôles, ne dépend dans cette hypothèse que des dimensions de celui-ci.

2° Les cycles de recul, tels que $P_1NP_0N'P_1$, sont assez fermés (NN' assez petit) pour qu'on puisse les confondre avec la droite moyenne P_1P_0 , que le point peut parcourir d'une manière réversible.

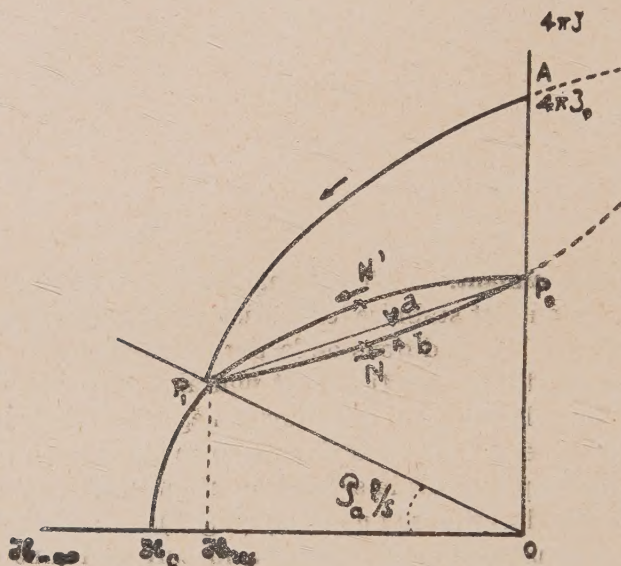


FIG. 1.

L'objet du présent travail est de contrôler ces deux hypothèses, et de s'assurer si le fait de les admettre ne conduit pas à des erreurs inadmissibles dans les tolérances de l'industrie.

2. Définition des quantités magnétiques, symboles et notations utilisés dans cette étude. — Le véritable état magnétique d'un acier à aimant est défini par son état d'aimantation I . Dans un volume assez faible, pour que la matière puisse y être considérée comme au même état en tous points, cette intensité est définie par le quotient du moment magnétique par le volume. L'induction B ne définit pas une qualité de l'acier ; mais cette notion a été généralisée par les ingénieurs, parce qu'ils s'occupent presque exclusivement de matériels dans lesquels le fer joue le rôle principal. Pour celui-ci, l'état magnétique n'existe que provoqué par un champ excitateur H ; il est donc logique de définir une induction, les actions $4\pi I$ du fer et H du champ étant

inséparables. Mais pour les aimants, l'état magnétique doit être mesuré par l'intensité d'aimantation. Les courbes figuratives des propriétés des aimants ou des aciers à aimant seront donc rapportées à cette valeur, ou mieux à son multiple $4\pi I$. Les différences entre $4\pi I$ et B sont faibles pour les aciers de faible coercivité dans la région où ils sont employés en général, entre 5.000 et 8.000 Gs ; mais il n'en est déjà plus ainsi aux faibles aimantations. L'écart peut même devenir considérable pour les aciers à forte coercivité, en particulier pour les alliages au Ni-Al-Co.

Une quantité qui seule reste invariable, quelles que soient les conditions de l'aimant, est la coercivité H_c , qui est la véritable grandeur spécifique de l'acier à aimant.

Pour simplifier l'écriture, nous adopterons le symbole A pour désigner le produit $4\pi I$, que nous appellerons souvent aimantation, et les notations seront alors les suivantes :

A_s : Valeur de la saturation de l'aimantation correspondant à une force magnétisante infinie. Pratiquement cette valeur sera celle pour laquelle l'aimantation rémanente ne changera pas.

H_s : Valeur de la force magnétisante correspondant à A_s .

Φ_s : Valeur du flux de force correspondant à A_s .

A_0 : Valeur de l'aimantation rémanente. Aimantation dans un anneau fermé de grand diamètre par rapport à la section, ou dans un barreau droit infiniment long, après réduction de la force magnétisante de H_s à 0.

Φ_0 : Valeur du flux correspondant à A_0 .

A_{res} : Valeur de l'aimantation résiduelle. Aimantation de l'équateur magnétique d'un aimant permanent, en circuit magnétique ouvert, sans force magnétisante ou démagnétisante extérieure à l'aimant.

H_{res} : Valeur de la force démagnétisante correspondant à A_{res} .

Φ_{res} : Valeur du flux correspondant à A_{res} .

H_c : Valeur de la force coercitive. Valeur de la force démagnétisante qu'il faut appliquer à un aimant quelconque, pour réduire l'aimantation de A_{res} à 0, ou requise pour amener l'aimantation d'un anneau fermé ou d'un barreau infiniment long de A_0 à 0.

F^u : Valeur de la force magnétomotrice disponible entre les pôles.

F_t : Valeur de la force magnétomotrice totale.

P_A : Valeur de la permeance aérienne.

$(A H)_{\max}$: Valeur maxima du produit des coordonnées de la courbe de désaimantation.

3. Matière des aimants. — Les aimants utilisés dans cette étude, nous ont été fournis gracieusement par les Etablissements Jacob Holzer, sous forme de barreaux cylindriques circulaires de 31,5 et 20 cm de longueur et 1 cm² de section ; cette forme étant la plus facile à se procurer et se prêtant le mieux à une bonne aimantation. Le nombre d'alliages obtenus par les combinaisons des divers éléments est extrêmement élevé et presque tous les aciers sont des aciers mixtes. Aussi, parmi les nombreux types d'acier fabriqués par cette Société, avons-nous pris les plus caractéristiques. Nous les diviserons en deux catégories. Dans la première, ceux qui doivent leur « dureté magnétique », (coercivité) à la trempe martensitique ; à savoir les aciers à faible et moyenne coercivité : aciers au tungstène, au chrome et au cobalt ; dans la deuxième, ceux qui doivent leur grande coercivité à la trempe structurale et à un recuit à haute température : alliages au nickel-aluminium-cobalt [1].

Nous indiquerons la composition chimique, qui peut différer légèrement d'un échantillon à l'autre, le traitement thermique, la dureté mécanique en degrés Rockwell, sous une charge de 150 kg et la résistivité électrique en $\frac{\mu\Omega\text{-cm}^2}{\text{cm}}$: les valeurs de la dureté et de la résistivité résultant de la moyenne de quatre mesures différentes.

Enfin, sauf spécification contraire, tous les alliages du premier groupe ont subi un revenu de 2 heures à 100° C, en vue de la stabilisation de l'état physico-chimique. On sait depuis longtemps (Barus et Strouhal [2], M^{me} Curie [3], Evershed [4]) qu'un tel traitement fournit une stabilisation assez complète des aciers au tungstène, chrome et cobalt ; stabilisation relative, l'état d'équilibre physico-chimique étant l'état recuit, mais suffisante, la vitesse de l'effet de revenu diminuant assez vite avec le temps. Quant aux alliages au Ni-Al-Co, leur température de revenu étant de 650° C, il était inutile de les passer à l'étau à 100° C.

TABLEAU 1.

Marque	Composition chimique en %								Traitement thermique	Δ	$\frac{\rho}{\mu\Omega\text{cm}^2}$ cm
	C	Si	Mn	Cr	Tu	Co	Mo	Ni	Al		
IM	0,700	0,310	0,140	0,610	6,150			0,200		65,4	26,6
ACR- 588	1,075	0,150	0,150	6,000				0,100		52,5	43,0
HaCo 5	0,880	0,265	0,220	6,870	0,450	11,050		0,075		54,8	58,0
HaCo 30	0,935	0,295	0,295	4,350	4,925	35,200		0,400			
717	0,850	0,160	0,160	4,400	4,300	34,600				62,0	73,5
Honial II	0,033	0,045	0,035			5,200		21,500	10,200	54,5	59,3
Honial X	0,055	0,220	0,040			5,000		29,200	11,300	46,6	83,0

4. Caractéristique des aciers. — Nous désignerons par le terme de caractéristique, la partie du cycle de désaimantation comprise dans le quadrant, limité par les aimantations positives et les champs négatifs. La méthode classique la plus employée pour le relevé de la caractéristique est la méthode dite du tore. Si le diamètre du tore est suffisamment grand par rapport à sa section, son aimantation sera très sensiblement uniforme, et le tracé de A en fonction de H donnera bien la caractéristique de l'acier. Pratiquement le bobinage d'un tore est une opération délicate et de plus, cette forme est difficilement obtenue pour les aciers très coercitifs en raison même des difficultés de fabrication et d'usinage. Au cas même où cela serait possible, le manque de place obligerait l'enroulement magnétisant à n'être pas uniformément réparti et l'on devrait admettre une très forte densité de courant pour aimanter ceux-ci à saturation. Aussi, cherche-t-on à transformer les aimants en un toroïde propre à la mesure. Le procédé le plus courant consiste à utiliser un aimant en fer à cheval, à branches longues, et à le fermer soit par une armature de fer doux de réluctance négligeable, soit par un aimant identique, à condition bien entendu, que dans cette dernière disposition, le bobinage recouvre également les deux pièces. Dans le premier cas, les deux branches verticales de l'aimant sont entourées par des bobines appropriées, enveloppant la plus grande partie possible de la pièce ; bobines qui recevront le courant excitateur. Webb et Ford [5] ont montré que cette façon de procéder conduisait à une bonne aimantation uniforme, à condition de pousser assez loin le courant d'excitation. Malheureusement, ce procédé ne peut s'appliquer aux aciers de coercivité supérieure à 150 ; des pôles conséquents apparaissent aux extrémités des bobines magnétisantes, et il serait indispensable de répartir convenablement des enroulements supplémentaires sur le cintre de l'aimant. Une façon de procéder plus commode consiste à prendre deux aimants bien identiques ; obtenus par exemple en brisant un barreau rectiligne par le milieu, et après en avoir soigneusement dressé et poli les extrémités, de les réunir par deux culasses de fer doux, de forte section. Les bobines magnétisantes entourent bien les deux barreaux et l'action démagnétisante de leurs extrémités est rendue négligeable, les culasses recouvrant bien les faces extrêmes des bobines. Le nombre des joints est doublé, mais la longueur des

épreuves étant suffisante, la correction à faire devient assez faible. On peut encore relever la caractéristique de l'acier, par rapport au rayon vecteur représentatif du champ démagnétisant de l'aimant, en plaçant l'éprouvette à l'intérieur d'un long solénoïde à âme d'air, trois fois plus long que celle-ci. L'action démagnétisante des faces extrêmes du solénoïde est rendue négligeable, en raison des dimensions relatives de la bobine et de l'éprouvette. Cette méthode nous a permis en particulier, le tracé des caractéristiques d'aimants.

5. Schéma de l'installation. — Le dispositif expérimental était conforme au schéma suivant (Fig. 2) :

S : Source de courant constituée par une batterie d'accumulateurs de 120 V.

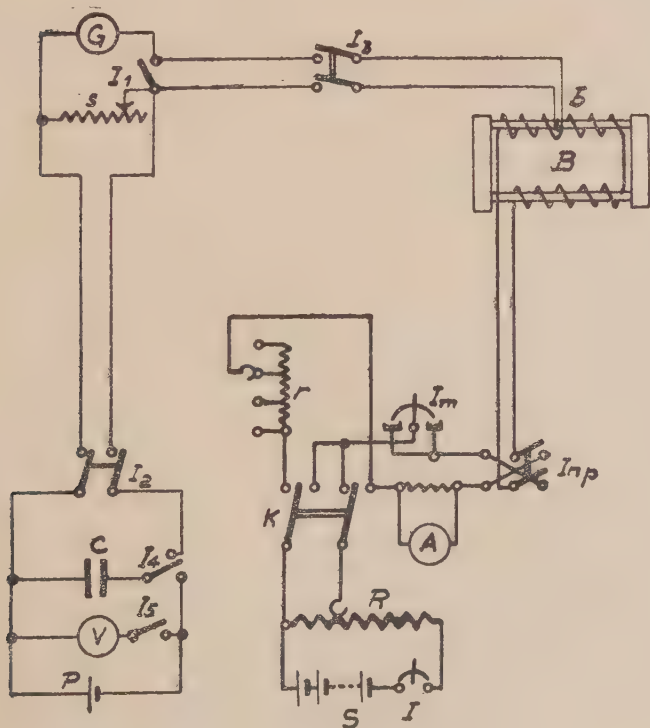


FIG. 2.

I : Interrupteur principal.

R : Rhéostat potentiométrique pour le réglage du courant de saturation.

K : Commutateur pour le tracé selon le procédé d'Ewing.

r : Série de rhéostats ou jeu de résistances.

A : Ampèremètre de précision, monté sur shunt, pour la détermination du champ.

In p : Inverseur permettant de décrire plusieurs cycles entre les valeurs $+ H_s$ et $- H_s$ de la force magnétisante de saturation.

b : Bobine d'épreuve, placée dans le plan équatorial de l'aimant.

B : Bobines magnétisantes, pouvant être remplacées par un solénoïde.

s : Résistance additionnelle. La valeur de $s + b$ constitue le shunt d'étalonnage.

I₁-I₂-I₃ : Interrupteurs permettant soit la mesure des $\Delta\Phi$, soit l'étalonnage de G.

I₄ : Clé de Sabine.

I₅ : Interrupteur permettant d'isoler le voltmètre.

G : Galvanomètre balistique.

P : Pile étalon pour l'étalonnage du balistique.

C : Condensateur étalon.

V : Voltmètre de précision de grande résistance.

Im : Interrupteur à mercure à rupture brusque.

6. Appareils employés. — Pour l'étalonnage du balistique, il était nécessaire de connaître C et U, avec une grande précision. Pour la valeur de la capacité, le nombre adopté était le nombre indiqué par le constructeur (condensateurs au mica de 0,1 et 0,2 μ F). Pour la connaissance de la différence de potentiel aux bornes de C, nous avons utilisé un voltmètre de précision de grande résistance — R = 1.500 Ω par volt à 15° C — étalonné soigneusement au potentiomètre et exact à moins de 0,1 %. La valeur de la tension aux bornes de C était de 4,47 V. Le galvanomètre balistique avait une résistance intérieure de 101 Ω à 15° C, sa durée d'oscillation simple était de 7,1 sec. et sa résistance critique de 1.400 Ω . Nous l'avions muni d'un miroir plan qu'éclairait une source lumineuse distante de 4 m 65 de celui-ci. Dans ces conditions, sa constante balistique en coulombs par mm était : $K = 37,95 \times 10^{-10}$.

La source lumineuse était constituée par une lampe Mazda en forme de tube rectiligne, de 50 cm environ de longueur. Elle était placée horizontalement au fond d'une boîte de forme parallépipédique de section carrée de 8 cm de côté. La partie avant de cette boîte portait une échelle graduée, permettant d'apprécier facilement les 0,2 mm. Des ouvertures étaient ménagées à l'arrière et sur le dessus de la caisse, pour assurer une bonne ventilation.

Une lunette munie d'un réticule permettait d'observer une partie de l'image de la règle graduée réfléchie par le miroir.

Les résistances mises en série avec le galvanomètre balistique, et constituant une partie du shunt, lors de l'étalonnage, étaient du type à décades.

Les bobines d'épreuve très étroites et de section très peu supérieure à celle des aimants, étaient constituées par du fil de cuivre de 1/10 de mm. isolé par 2 couches de soie. Elles étaient à prises multiples et comprenaient 100-200-400 spires. Leur résistance totale était de 80 Ω ; les résistances intermédiaires de 29,8 et 10,2 Ω à 15° C. Le support des bobines était constitué par du papier enroulé et collé sur un mandrin paraffiné, permettant d'avoir un jeu de 0,3 mm entre le diamètre intérieur de la bobine et le diamètre de l'aimant. Les joues des bobines étaient en carton Presspahn. Après enroulement du fil, toute la bobine était trempée dans de la gomme laque. D'autres bobines de 5, 10, 20 spires étaient constituées par enroulement du fil sur un petit tube de bakélite portant une gorge annulaire très étroite. Leur résistance respective était de 0,6, 1,3 et 2,8 Ω à 15° C.

Les rhéostats permettant de faire varier le courant excitateur dans les bobines étaient du type à variation continue, à curseur.

Les bobines magnétisantes B étaient à spires jointives. Elles avaient une longueur de 13 cm, un diamètre intérieur de 20 mm et un diamètre extérieur de 60 mm. Le fil constituant l'enroulement était en cuivre de 1,8 mm de diamètre, isolé par 2 couches de coton. Le mandrin de bois permettant le bobinage était tel que les bobines terminées, enrubannées et gommelaquées, venaient tout contre les armatures, constituées par deux plaques de fer doux de 3 cm d'épaisseur, 8 cm de largeur et 20 cm de longueur. Elles étaient réunies entre elles par des tiges filetées. Le nombre de spires était au total de 345 et le nombre de couches

était de 7. La résistance de chaque bobine était de $0,345 \, \Omega$ à 20°C . Dans ces conditions le champ valait :

$$H = 33,4 \text{ I (I en ampères)}$$

Le champ maximum permettant de dépasser la force coercitive de l'alliage Honial X, étant de 700 Oe, l'intensité maxima admise pour le tracé des caractéristiques était comprise entre 20 et 25 ampères. En opérant rapidement, l'élévation de température des bobines n'influaient pas d'une manière sensible sur l'aimantation du barreau. Pour les valeurs instantanées de l'intensité de saturation, nous pouvions prendre 100 ampères sur le secteur à 120 V.

7. Disposition des appareils. — La disposition des appareils est relativement indiquée sur la figure 2. Le galvanomètre, son shunt, les bobines excitatrices étaient situées sur une table de laboratoire, parfaitement isolée ; les axes des bobines étaient dans un plan normal à celui du cadre mobile, et distantes de 4 M environ de celui-ci. Le reste de l'appareillage était disposé sur une autre table, faisant face à la première, et distante de celle-ci de 4 M également. Le condensateur était réuni au galvanomètre par des fils de cuivre de 0,6 mm. de diamètre et distants de 20 cm. Ils étaient fixés au plafond par des taquets isolants. Dans ces conditions la capacité entre les deux fils parallèles était négligeable devant celle du condensateur. Les autres connexions étaient en fil de cuivre, sous tresse et caoutchouc, de 16/10 mm.

8. Tracé de la caractéristique. — Trois séries d'essais ont été effectuées pour le tracé de chaque caractéristique ; soit en changeant la position du barreau dans la bobine, soit en le retournant bout pour bout, soit en permutant les barreaux, soit enfin en inversant le courant d'excitation et en changeant le nombre de spires de la bobine d'épreuve. Notons que le flux parasite passant dans celle-ci à côté de l'échantillon était insignifiant. Un essai préliminaire nous permettait d'obtenir des valeurs convenablement espacées de l'induction B, et de repérer les diverses positions du curseur des rhéostats. L'étalonnage du balistique était fait avant et après chaque série de mesures, dans les conditions même d'amortissement où il se trouvait.

Les méthodes de tracé habituellement employées sont les méthodes de Rowland, d'Ewing, d'Ewing-Jouaust et d'Iliovici. Nous les rappellerons brièvement. Dans la première on donne au champ magnétique une série de valeurs comprises entre un maximum $+ H_s$ et un minimum $- H_s$, et on relève la variation ΔB de l'induction lorsqu'on passe de la valeur H du champ à la valeur suivante. Dans la deuxième, on mesure la variation de B , lorsqu'on passe successivement de la valeur $+ H_s$, à chacune des valeurs H_1, H_2, H_3 du champ, comprises entre $+ H_s$ et $- H_s$, et en remontant à $+ H_s$ après chaque mesure. Dans la méthode, modifiée par Jouaust, en raison du traînage magnétique, on mesure la variation de l'induction, lorsqu'on passe d'une des valeurs successives du champ à la valeur H_s . Enfin dans la méthode d'Iliovici, on réalise chaque fois le cycle complet $+ B_s B_1 - B_s + B_s B_2$, etc... Dans le cas des aimants permanents constitués par des aciers durs, le traînage magnétique est sans doute insignifiant et on peut indifféremment employer les méthodes de Rowland, d'Ewing ou d'Iliovici ; avec toutefois une variante, car le tracé du cycle complet n'a pas une importance capitale et c'est à partir du point de rémanence ($A_0, H = 0$), que l'on effectue les mesures.

On reproche évidemment, à la première méthode son manque de précision, les résultats étant liés les uns aux autres. Dans les autres méthodes, au contraire, les résultats étant indépendants, on peut reprendre un point erroné sans avoir à reprendre les autres. Les trois méthodes offrent le même inconvénient, relativement aux courants de Foucault, dans le cas des échantillons massifs, surtout lorsque le champ démagnétisant est relativement grand (Tracé des courbes d'aimants en circuit magnétique ouvert). Seul, un tracé très lent, avec inscription graphique des courbes, permettrait de les éliminer pratiquement.

En définitive, nous avons adopté le tracé par la méthode de Rowland. On est en effet obligé d'admettre de fortes densités de courant pour atteindre la valeur de saturation. Le passage répété à cette valeur, risque d'échauffer notablement l'échantillon, de changer son état magnétique et de rendre la valeur de la saturation incertaine. De plus les variations de l'induction pouvant être de même amplitude (1.000 à 1.500 Gs), on pourra toujours utiliser une bonne longueur de l'échelle lumineuse, et avoir la même sensibilité et la même précision. Pour $\Delta B =$

1.500 Gs, la déviation du galvanomètre était de 282 mm, avec une bobine d'épreuve de 100 spires $\left(\psi = \frac{\Delta B \cdot ns}{KR}\right)$. La précision de lecture était donc supérieure à 1 pour 1.000.

En ce qui concerne la saturation pratique, Wurschmidt [6] indique qu'il faut pousser la force magnétisante aux valeurs suivantes :

$H_s =$	300 Oe	pour un acier de	$H_c =$	75 Oe
	600	»		160 »
	1.100	»		220 »

Pour les aciers plus coercitifs, d'autres auteurs conseillent de pousser l'aimantation jusqu'à 1.500 Oe pour les aciers à haute teneur en cobalt et à 3.500 Oe pour les alliages au Ni-al et Ni-al-Co, actuellement fabriqués en France.

Les valeurs pour lesquelles nous avons remarqué que l'aimantation rémanente ne changeait pratiquement pas, sont les suivantes :

$H_s =$	400 Oe	pour un acier de	$H_c =$	76 Oe
	520	»		121 »
	1.300	»		238 »
	2.500	»		410 »
	3.200	»		640 »

Dans ces conditions, les valeurs de B_s sont assez voisines des valeurs obtenues par application de la formule empirique de Sanford [7] : $B_s = 1,38 B_o$.

La valeur de l'induction rémanente est définie en prenant la moyenne de la différence des ΔB obtenue en passant, soit de $+ H_s$ à 0, et de 0 à $- H_s$, soit de $- H_s$ à 0 et de 0 à $+ H_s$.

Après avoir fait subir à la valeur de l'induction B_o , la correction due aux joints, nous sommes passés aux aimantations en ajoutant les ΔH aux ΔB dans le 4^e quadrant. Connaissant la valeur de l'aimantation rémanente A_o , il était facile de déterminer H_c , défini comme étant la force annulant l'aimantation.

D'après les travaux d'Ewing, nous avons admis la valeur moyenne de 0,004 cm d'air par joint ; ce qui nous conduisait à une correction de force magnétomotrice de 6,15 Oe pour 10.000 Gs.

9. Résultats. — Les courbes et le tableau suivant résument

les résultats obtenus sur les différents types d'acier. D'un côté nous avons représenté les courbes $A = f(H)$, de l'autre les courbes $(A H) = f(A)$. (Fig. 3). Dans le tableau 2, nous avons indiqué les valeurs de A_0 et de H_c , les valeurs du produit $(A H)_{\max}$, et enfin les valeurs de $(A_0 H_c)$, ce produit étant une fonction linéaire de $(A H)_{\max}$.

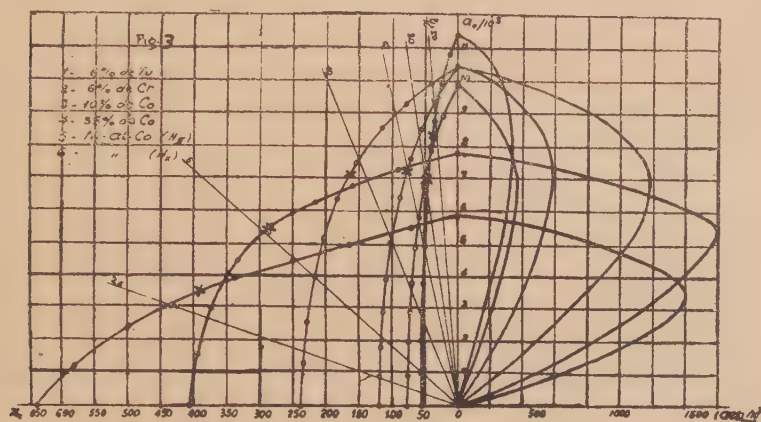


FIG. 3.

Plusieurs critères d'acier à aimant ont été proposés ; parmi ceux-ci, on peut citer : $(A H)_{\max}$, $(A_0 H_c)$ — A_0/A_{resm} — A_0/H_c — $A_0 H_c/A_{\text{resm}}$. (A_{resm} désignant l'aimantation résiduelle correspondant au maximum du produit des coordonnées).

Le premier critère, indiqué par Evershed [8] indique vraiment la qualité de l'acier et a un caractère physique bien net, étant proportionnel, dans la mesure où l'aimantation est uniforme, au maximum de l'énergie emmagasinée dans le champ de l'aimant. Celle-ci étant $W = \frac{F_u \Phi_u}{8\pi}$, on a bien $\frac{W}{V} = \frac{A_{\text{res}} H_{\text{res}}}{8\pi}$, V étant le volume de l'aimant.

Une vérification expérimentale de l'efficacité de ce critère a été faite par Scott [9], pour les aciers à moyenne coercivité.

Les valeurs pour lesquelles le rapport $\frac{A_{\text{res}}}{V}$ est maximum correspondent bien aux valeurs rendant le produit $(A H)$ maximum, indiquant ainsi le point de fonctionnement économique. Le critère $A_0 H_c$, obtenu directement représente moins bien que

le précédent la valeur d'un aimant. Les autres critères peuvent dans certains cas prêter à confusion.

TABEAU 2.

Nature de l'acier	H_c	A_o	$A_o H_c$	$(AH)_{max.}$	Valeur des coordonnées
6 % de Tu	55	11.400	626×10^3	332×10^3	8.300×40
6 % de Cr	76	9.850	749×10^3	350×10^3	7.000×50
10 % de Co	121	10.450	1.265×10^3	575×10^3	7.200×80
35 % de Co	238	10.430	2.490×10^3	1.160×10^3	7.150×62
Ni-Al-Co	410	7.750	3.180×10^3	1.540×10^3	5.450×288
»	640	5.850	3.750×10^3	1.400×10^3	3.600×339

Il est intéressant de remarquer que le rapport $\frac{A_{resm}}{A_o}$ est sensiblement constant, et vaut en moyenne 0,69. La valeur indiquée par Scott pour ce rapport était de 0,65.

CHAPITRE II

10. La Perméance aérienne. — La clarté de l'exposé qui va suivre impose ici, le rappel de quelques notions générales sur la création de l'aimant et son mode d'action.

Considérons un tore de très grand diamètre par rapport à sa section, et excité par un bobinage bien uniformément réparti, il y a aimantation très sensiblement uniforme dans toutes les sections, chaque élément de longueur du circuit magnétique, participant à part égale à la force magnétomotrice et à la réluctance. Il n'y a donc aucune fuite, aucune masse magnétique libre, donc aucune ligne de force aérienne. La pièce ne peut pas être qualifiée aimant, car n'ayant aucune action extérieure, elle n'est susceptible d'aucune application. Il en est à *fortiori* de même d'un aimant en fer à cheval à branches longues, fermé par une armature de réluctance négligeable. Si la coercivité de l'acier est relativement faible, et si l'enroulement recouvre bien les parties droites des branches de l'aimant, après aimantation à saturation et rupture du courant excitateur, l'aimantation rémanente sera alors sensiblement uniforme. Enlevons l'armature de fermeture du circuit magnétique, nous créons un entrefer et des pôles apparaissent aux extrémités des branches de la pièce. Nous avons alors créé un *aimant permanent*, qui peut être considéré comme une source de force magnétomotrice douée d'une réluctance. Celle-ci dépend en outre de l'histoire antérieure à celle de l'établissement du flux. Pour un flux embrassé donné, une partie de la force magnétomotrice sera employée à faire circuler les lignes de force à travers l'aimant même, le reste étant disponible pour maintenir le flux dans le circuit extérieur.

Soit H_u , le champ obtenu dans un entrefer très faible. Dans cet espace, l'énergie par unité de volume sera : $\frac{H_u^2}{8\pi}$ et l'énergie

totale $W = \frac{H_u^2 s e}{8\pi}$, s étant la section de l'aimant et e la longueur de l'entrefer.

Le flux de force sera donc : $\Phi = H_u s$ et la force magnétomotrice utile : $F_u = H_u e$, les conditions étant constantes tout le long de l'aimant.

Mais en pratique, l'entrefer est toujours assez grand, pour que des fuites apparaissent entre les pièces polaires, et le long des branches de l'aimant. Une partie de l'entrefer constitue le volume utile de perméance P_u ; le reste est à considérer comme perméance des fuites, P_f . Si même la section de l'aimant est uniforme, il n'en est pas de même de l'aimantation qui varie de la section équatoriale aux extrémités. La réluctance d'un élément de longueur est variable. Nous aurons donc pour expression du flux utile : $\Phi_u = P_u F_u$, et pour celle du flux de fuite : $\Phi_f = P_f F_u$.

Le flux résiduel sera alors : $\Phi_{res} = \Phi_u + \Phi_f = (P_u + P_f) F_u$ et l'énergie : $W = \frac{1}{8\pi} (P_u + P_f) F_u^2$.

Si nous désignons par P_i , la perméance intérieure de l'aimant pour l'état d'aimantation considéré, et par $P_A = P_u + P_f$, la perméance aérienne, nous aurons les relations suivantes ; en circuit fermé :

$$\Phi_o = P_i F_t,$$

Φ_o étant le flux rémanent et $F_t = H_c l$, la force magnétomotrice totale ; en circuit ouvert :

$$\Phi_{res} = P_A F_u = F_t \frac{P'_i P_A}{P'_i + P_A}.$$

L'aimant devant fournir une énergie déterminée devra avoir un volume minimum, et l'aimantation correspondant aux dimensions économiques sera déterminée par l'intersection de la droite de coefficient angulaire $P_A \frac{l}{s}$ avec la caractéristique de désaimantation ; ce point étant celui qui donne le maximum du produit $(A H)$, comme nous l'avons rappelé antérieurement.

Il se trouvera d'ailleurs à l'intersection de la diagonale du rectangle de côté A_o et H_c , avec la caractéristique. La connaissance de la perméance aérienne, pour des dimensions déterminées permettra donc de résoudre le problème. On fera généra-

lement des approximations successives, pour déterminer les dimensions, et le choix de l'acier.

11. Relation entre la perméance aérienne et le facteur démagnétisant. — Une grande partie de nos mesures ayant été faite sur des barreaux cylindriques circulaires, nous raccorderons nos symboles et raisonnements d'ingénieur, avec ceux qu'ont employés les physiciens.

Nous établirons la relation entre le facteur démagnétisant N de « Du Bois-Reymond » [10] et la perméance aérienne P_A . Soit un aimant cylindrique de longueur l et de diamètre d , aimanté uniformément par un champ parallèle à son axe. Soit I son intensité d'aimantation dans le plan équatorial. La valeur calculée du champ démagnétisant dû à l'action de ses propres pôles est : $4\pi I \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}}\right)$. Si nous appelons H le champ produit par l'enroulement magnétisant, tout se passera au point de vue de l'aimantation du centre du barreau, comme si cette région faisait partie d'un circuit magnétique fermé, le champ magnétisant étant : $H' = H - 4\pi I \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}}\right)$. La longueur des barreaux étant nécessairement courte, la correction s'impose ; mais l'action démagnétisante des pôles n'étant pas calculable, en raison de la non-uniformité de l'aimantation, nous avons admis avec du Bois-Reymond un facteur N , tel que $N I$ représentât le champ démagnétisant.

L'aimant étant considéré en l'absence de tout champ excitateur, on a évidemment :

$$F_u = N I = H_1 l \quad \text{et} \quad 4\pi I = F_u \cdot P_A / s$$

La relation fondamentale reliant la perméance aérienne au facteur démagnétisant est donc :

$$P_A \frac{l}{s} = \frac{4\pi}{N}.$$

Cette perméance, ainsi définie, n'est d'ailleurs qu'apparente, en ce sens, que les conditions n'étant pas constantes tout le long de l'aimant, elle comprendra, d'une part, la véritable perméance aérienne de l'aimant, d'autre part la variation de la perméance

intérieure, les deux étant inséparables. Il est bien évident que cette dernière variation sera assez faible, comparée à la valeur de la perméance aérienne et, qu'en pratique la relation précédente sera valable. Ainsi la constance de la perméance aérienne se confond avec celle du facteur démagnétisant. L'approximation correspondante est nécessaire pour appliquer les calculs aux cas pratiques ; les écarts qui peuvent en résulter sont, comme nous allons le voir, de ceux dont l'industrie doit s'accommoder. La comparaison des courbes $I = f(H)$, tracées pour des longueurs différentes du barreau, ont amené Du Bois-Reymond, à admettre la constance du facteur N , en fonction de l'aimantation, au moins jusqu'à $\frac{l}{d} = 10$.

12. — Nous avons voulu nous assurer de ce fait, et voir en particulier pour les alliages très coercitifs s'il en était de même. De plus nous avons comparé, pour une même aimantation, les valeurs de N en fonction de la nature de l'alliage. Les essais ont porté sur des barrettes de 31,5, 20 et 10 cm de longueur et 1 cm² de section circulaire. Elles étaient aimantées, en les plaçant à l'intérieur d'un solénoïde à âme d'air de 58,5 cm de longueur, de 2 cm de diamètre intérieur et 6 cm de diamètre extérieur, parcouru par un courant continu. L'enroulement magnétisant était constitué par 3.020 spires de fil de cuivre de 1,2 mm de diamètre, isolé par 2 couches de coton, réparties en 8 couches, et d'une résistance totale de 5,3 Ω à 15° C. Sa constante de temps valant 0,00075, l'établissement du courant était instantané. Le support était constitué par un tube de verre Pyrex de 2 mm d'épaisseur, encastré dans deux joues de contre-plaqué. La constante du solénoïde, supposé indéfini était : $H = 1,25 n I = 64,5 I$. L'action démagnétisante des faces terminales du solénoïde était négligeable au centre, et le champ était connu à 2 pour 1.000 près ; à 10 cm du centre, il valait encore 0,997 H .

Dans le calcul du bobinage, nous avons été amenés à prendre l'intensité maxima admissible avec l'installation, les ampères-tours, toutes choses égales d'ailleurs étant plus grands, quand n est faible. Le tracé d'un cycle étant rapide, l'échauffement des spires médianes avait une assez faible importance.

Remarquons que dans cette manière de procéder la valeur de l'aimantation résiduelle pourra changer légèrement selon la

méthode choisie pour le parcours du cycle. Si on le décrit très lentement, en faisant varier le courant excitateur d'une manière continue, l'aimantation résiduelle sera plus élevée que si on le parcourt par bonds, en donnant au courant des variations brus-

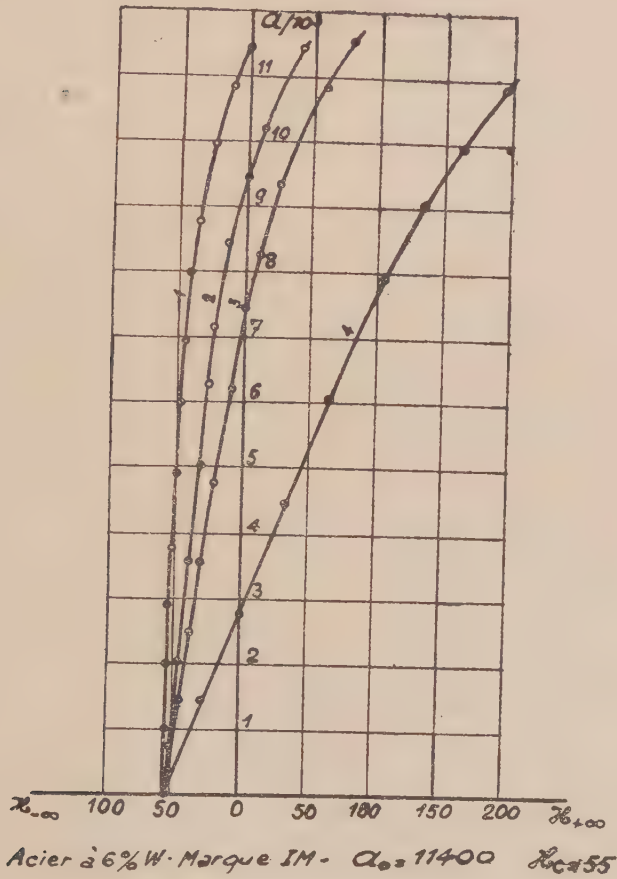
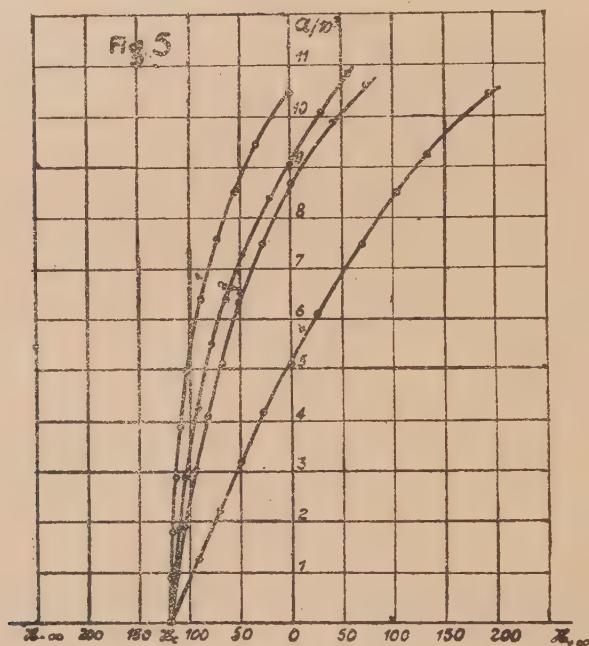


FIG. 4.

ques. Si cette variation est de grande amplitude comme dans le tracé d'Ewing, l'aimantation résiduelle sera encore plus faible. En général, si les points sont bien échelonnés, les différences seront insensibles dans les deux premières méthodes, surtout lorsque le champ démagnétisant sera relativement faible. Ainsi,

pour les aciers très coercitifs, il n'existe aucune différence sensible. L'aimantation résiduelle ayant été mesurée à l'aide d'une même bobine-bague, enlevée brusquement du plan équatorial, en inversant chaque fois le barreau. Nous avons trouvé sur des barrettes de 20 cm, des différences de 0,4 % pour l'acier au Tu



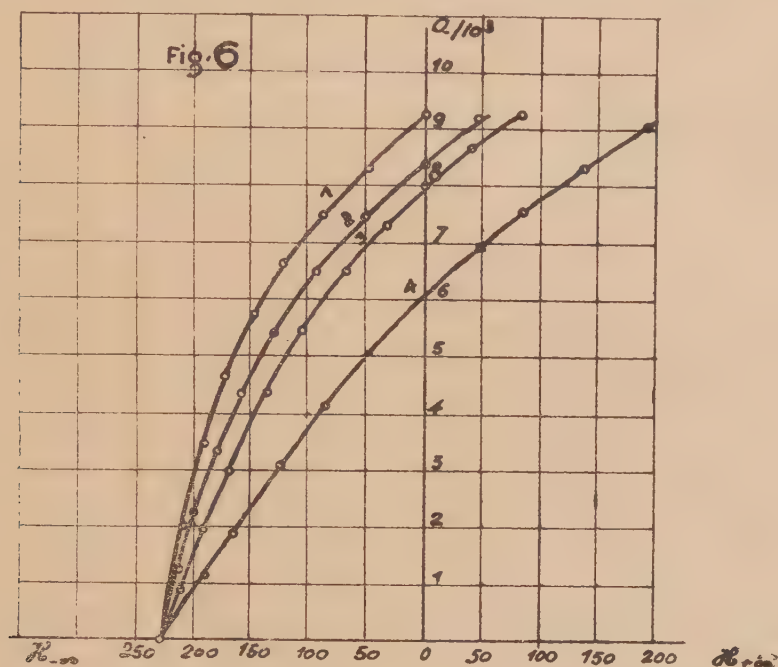
Acier à 10 % de Co - Marque HaCo 5 - $C_0 = 10450$ $H_c = 127$

FIG. 5.

et de 0,17 % pour l'acier à 10 % de Co, entre le tracé très lent et le tracé de Rowland (points distants de 1.000 à 1.500 Gs) et des différences de 4 et 0,75 %, pour les mêmes aciers, entre le tracé très lent et le tracé d'Ewing.

Ce fait qui indique une aimantation anormale a été mise en évidence par Ewing [11], Waltenhofen [12], Gümlich et Schmidt [13], et enfin par Jouaust [14]. D'après cet auteur, le phénomène serait dû « à des courants induits circulant d'abord dans les couches périphériques, puis pénétrant de plus en plus dans l'éprouvette. Ces courants tendant à prolonger l'ac-

tion du champ magnétisant, produiraient des lignes de force traversant l'éprouvette dans le même sens que celles que produisaient primitivement le champ et se fermeraient par l'air, mais ces courants parvenant à une certaine épaisseur dans le métal, quelques-unes de ces lignes de force tendraient à se fermer par l'acier, en produisant une aimantation inverse de



Acier à 35% de Co - Marque HaCo 30- α_0 9375 H_c 226

FIG. 6.

l'aimantation précédemment acquise. Il en résulterait une augmentation du champ démagnétisant et par suite une diminution de leur aimantation résiduelle. »

Pour Gümlich et Schmidt, non seulement l'aimantation résiduelle, mais encore la force coercitive dépendraient du mode de tracé. Le moyen d'obvier à cet inconvénient serait l'emploi d'une méthode magnétométrique, pour la détermination du moment magnétique, soit par une méthode d'oscillations, soit

par comparaison des déviations du magnétomètre obtenues avec l'aimant et avec un bobinage d'aire exactement connue, et parcouru par un courant également bien déterminé. On aurait alors, M étant le moment magnétique, s la section du barreau et d la distance des pôles : $I = \frac{M}{sd}$. Pour avoir les valeurs absolues de I , il faudrait connaître d et supposer sa constance.

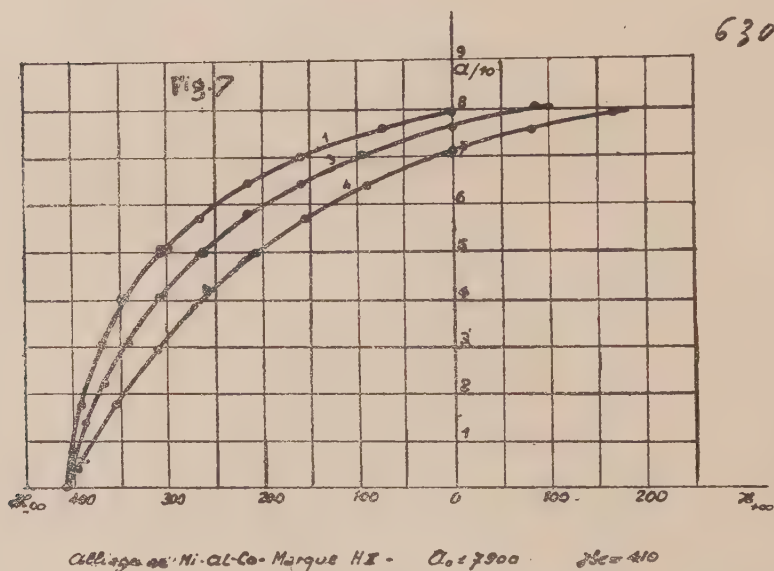


FIG. 7.

13. — Les tableaux et les courbes suivants (Fig. 4 à 7) se rapportent aux caractéristiques de désaimantation (courbe de l'acier : courbe 1) et aux caractéristiques d'aimants, obtenues au moyen du solénoïde, pour les longueurs de 31,5, 20 et 10 cm (courbes 2-3-4), des divers types d'acier. Il est aisé d'en déduire pour chaque état d'aimantation, la valeur du facteur N et par conséquent celle de la perméance aérienne apparente ; ces valeurs ayant été relevées sur un tracé à grande échelle (2 cm pour 10 Oe et 1.000 Gs).

Valeurs de N pour diverses aimantations.

TABLEAU 3. — $\frac{l}{d} = 27,8$.

A (Gs)	Acier à 6% Tu (IM)	Acier 10% Co Ha Co 5	Acier 35% Co Ha Co 30
1.000	0,0520	0,0705	0,0685
2.000	0,0500	0,0596	0,0685
3.000	0,0500	0,0576	0,0670
4.000	0,0490	0,0570	0,0670
5.000	0,0480	0,0550	0,0640
6.000	0,0475	0,0535	0,0640
7.000	0,0444	0,0540	0,0630
8.000	0,0403	0,0530	0,0630
9.000	0,0377	0,0500	0,0685
10.000	0,0425	0,0504	
11.000	0,0450		
Moyenne de N	0,0460	0,0560	0,0670

TABLEAU 4. — $\frac{l}{d} = 17,7$.

A (Gs)	Acier 6% Tu IM	Acier 10% Co Ha Co 5	Acier 35% Co Ha Co 30	Ni-Al-Co H _{II}
1.000	0,0800	0,0905	0,0987	0,131
2.000	0,0785	0,0880	0,0980	0,125
3.000	0,0791	0,0840	0,0985	0,121
4.000	0,0796	0,0822	0,0980	0,111
5.000	0,0788	0,0800	0,0972	0,110
6.000	0,0785	0,0731	0,0965	0,105
7.000	0,0791	0,0707	0,0950	0,111
8.000	0,0780	0,0683	0,0940	
9.000	0,0765	0,0652	0,0940	
10.000	0,0750	0,0642		
11.000	0,0795			
Moyenne	0,0782	0,0786	0,0965	0,116

14. — L'examen des résultats montre que, généralement, le facteur démagnétisant augmente quand l'aimantation diminue. Sa variation est d'autant plus faible que l'acier est plus coercitif. En effet, plus l'aimantation sera faible, plus les pôles seront distants. La ligne moyenne d'un tube de force du flux de fuite sera plus longue. La perméance géométrique, rapport de la section moyenne à la longueur moyenne de ce tube sera plus

petite. Le facteur démagnétisant N sera donc plus grand. Il varie également avec la coercivité pour la même raison, et il est d'autant plus grand, que la coercivité de l'acier est plus élevée. Cette variation, fonction de la position des pôles, et de la répartition du potentiel magnétique absolu le long de l'aimant, nous a amené à étudier la variation de ce potentiel et de l'aimantation résiduelle dans les diverses sections, par une autre méthode permettant de déterminer la véritable perméance aérienne. Ces deux valeurs sont mesurables, la dernière à l'aide d'une bobine-bague très étroite, la première à l'aide d'un *potentiomètre magnétique de Chattock* [15].

TABLEAU 5. — $\frac{l}{d} = 8,85$

A (Gs)	Acier 6% Tu IM	Acier 10% Co Ha Co 5	Acier 35% Co Ha Co 30	Ni-Al-Co H _{II}
1.000	0,244	0,266	0,290	0,260
2.000	0,244	0,262	0,290	0,252
3.000	0,238	0,254	0,280	0,250
4.000	0,238	0,250	0,280	0,240
5.000	0,238	0,245	0,285	0,240
6.000	0,234	0,245	0,285	0,242
7.000	0,236	0,245	0,285	0,242
8.000	0,234	0,245	0,270	
9.000	0,234	0,232	0,270	
10.000	0,236	0,216		
11.000	0,248			
Moyenne	0,238	0,246	0,282	0,247

15. — Nous rappellerons brièvement la théorie de cet instrument trop peu connu.

Soient P et Q, deux points dans un champ magnétique. La différence des potentiels magnétiques est définie par :

$$u = \int_P^Q H \, dl.$$

L'intégrale est prise suivant un chemin quelconque de longueur l , pourvu qu'il ne rencontre aucun corps ferro-magnétique. Disposons entre P et Q une hélice régulière de section constante et petite, de n_1 tours de fil par cm de longueur. Si le flux traversant les spires varie, la force électromotrice développée dans l'hélice est :

$$e = \frac{d}{dt} \iint H \, ds \, dn = \frac{d}{dt} n_1 \iint H \, ds \, dl.$$

$$= \frac{d}{dt} n_1 s \int H dl = n_1 s \frac{du}{dt};$$

u étant la valeur moyenne précédemment définie. A condition donc d'avoir n . constant sur toute la longueur de l'hélice, e est proportionnel à $\frac{du}{dt}$. La longueur, la section et le nombre de spires étant bien connus, on peut en déduire la constante du potentiomètre. En reliant l'enroulement à un galvanomètre balistique, une variation brusque de u , produira une elongation, qui si elle est petite sera proportionnelle à : $U_p - U_q = K \psi$, K étant la constante du galvanomètre. Si r est la résistance totale du circuit de décharge (potentiomètre, galvanomètre, résistance) nous aurons :

$$e \, dt = n_1 s \, du \quad \text{ou} \quad i r \, dt = r \, d q = n_1 s \, d u.$$

d'où :

$$u = \frac{n_1 s}{r} \cdot q = \frac{r k}{n_1 s} \cdot \psi.$$

Il est encore possible d'étalonner le potentiomètre par la méthode indiquée par Campbell [16]. On ferme l'hélice à travers un bobinage B de N spires. En fermant le courant dans cette bobine, on a une elongation donnée par $4 \pi N i = K' \psi$.

16. — Le potentiomètre peut être réalisé sous forme souple ou rigide. Dans le premier cas, l'enroulement se fera sur un noyau souple, mais inextensible. Imaginé pour l'étude des champs de dispersion des dynamos, il a été réalisé par Chattock, en formant le noyau par une toile roulée sur elle-même en hélice et vernie. Ragowski enroulait le fil sur une bande de presspahn, formée vraisemblablement de feuilles minces superposées.

Pour l'application aux aimants permanents, la forme adoptée était la suivante. Le fil, très fin, était enroulé sur un tube de caoutchouc plein, constitué par la superposition de brins élastiques contenus dans une mince gaine tressée. Cette forme se prêtait assez bien aux mesures effectuées sur les aimants cylindriques circulaires, les spires extrêmes, par simple pression du

potentiomètre sur le barreau, recouvrant bien la partie de surface latérale située sous elles. Ainsi constitué, notre instrument avait 3.060 spires de fil de 0,1 mm de diamètre, enroulées sur 2 couches. Son diamètre moyen était de 0,985 cm, sa longueur de 30 cm et sa résistance de 204 Ω à 15° C. Le nombre de spires par cm de longueur étant de 102, la constante était donnée par la relation :

$$u = \frac{37,95 \times 1.400 \times 10^8}{102 \times 0,76 \times 10^{10}} = 6,9 \psi.$$

Dans le cas de la forme rigide, l'enroulement se fera sur une baguette assez longue (au moins 30 cm) pour que l'une de ses extrémités puisse être considérée comme hors du champ, l'autre étant placée en un point P de l'aimant. L'éloignement brusque du potentiomètre ou de l'aimant, donnera la mesure du potentiel absolu du point touché. Cette forme s'applique bien aux aimants à surfaces planes ; dans notre cas, pour les raisons indiquées plus haut, nous avons utilisé encore le potentiomètre souple, celui-ci étant simplement rendu rigide par sa fixation sur une planchette. Les mesures s'effectuaient en enlevant l'aimant. Pour les mesures de flux, la bobine-bague était placée dans les différentes sections, le long de l'aimant. Cette bobine était également fixe et les mesures se faisaient en arrachant l'aimant. Elle avait un diamètre intérieur de 12 mm, une épaisseur de 0,4 mm, et comprenait 20 spires de fil de 0,1 mm de diamètre, isolé par 2 couches de soie et d'une résistance de 2 Ω 4 à 20° C. Nous avons dans ces conditions :

$$A = \frac{K R}{ns} \cdot \psi = \frac{37,95 \times 1.400 \times 10^8}{20 \times 1 \times 10^{10}} = 2,65 \psi.$$

Les mesures ont été effectuées en déplaçant le barreau le long d'une échelle graduée, depuis la section équatoriale jusqu'à l'une de ses extrémités, puis les mêmes mesures ont été reprises en retournant le barreau bout pour bout.

La distance séparant les pôles a été déterminée à l'aide du potentiomètre magnétique, sous sa forme rigide (maximum de $\frac{F_u}{2}$) et sous sa forme souple (maximum de F_u). Les deux valeurs obtenues étaient bien concordantes.

Les dimensions des bobines de mesure étaient telles que les

valeurs obtenues ne différaient pas sensiblement des valeurs ponctuelles.

Les essais ont porté sur des échantillons identiques à ceux utilisés pour l'étude du facteur N , sauf toutefois en ce qui concerne l'acier marqué Ha Co 30 pour l compris entre 10 et 20 ; cet acier ayant été remplacé par un acier supérieur marqué 717. Les éprouvettes étaient raccourcies progressivement à l'aide d'une scie spéciale, constituée par un disque de tôle tournant dans de la potée d'émeri ; ce qui permettait de découper ces aciers durs sans élever leur température.

17. — Les tableaux suivants sont relatifs aux mesures précédemment définis (variation de l'aimantation et du potentiel magnétique absolu) pour des éprouvettes cylindriques circu-

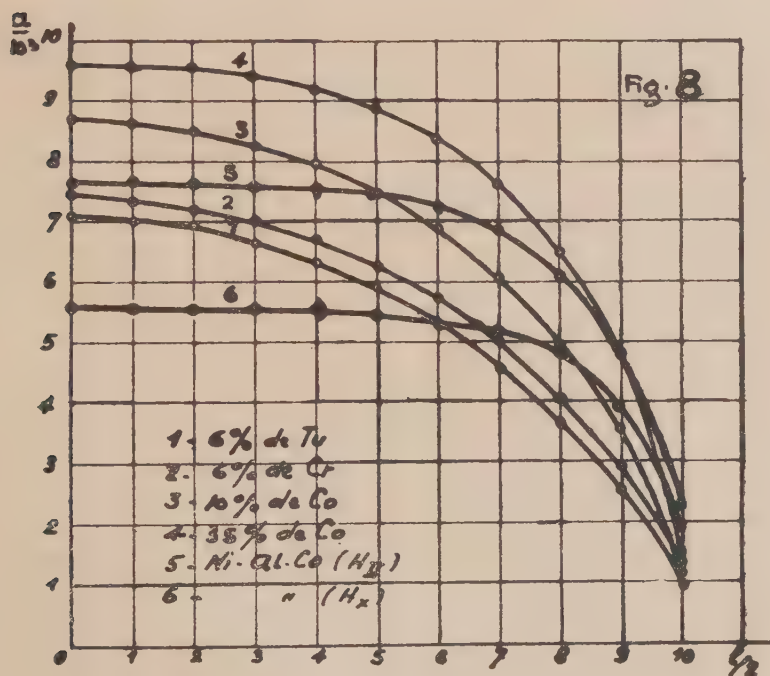


FIG. 8.

lares d'aciers divers et de longueurs égales à 31,5, 20,15 et 10 cm. La section était toujours égale à 1 cm².

Seules les courbes relatives aux aimants de 20 cm de long ont

TABLEAU 6. — Longueur des éprouvettes : 31,5 cm.

Acier	$\frac{l}{2}$																	δ_{cm}	F_u max.
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15,75		
6 % Tu (IM) { Φ { F/2	9.450 0	9.400 17	9.300 33	9.250 55	9.190 83	9.050 112	8.800 141	8.540 174	8.175 210	7.710 248	7.160 288	6.550 324	5.800 372	4.900 420	3.720 472	2.315 500	1.220 476	30,0	1.000
10 % Co HaCo 5 { Φ { F 2	9.040 0	9.020 15,2	9.000 27,5	8.960 41,5	8.925 56,5	8.850 77,6	8.780 96,5	8.635 124	8.455 158,5	8.200 186	7.870 248	7.390 293	6.700 366	5.800 435	4.450 530	2.700 604	1.595 572	30,4	1.228
(35 % Co HaCo 30) { Φ { F/2	8.350 0	8.350 8,5	8.350 15,2	8.350 20,7	8.350 38,5	8.350 44,5	8.340 62	8.325 79,5	8.250 108	8.140 140	7.965 182	7.685 221	7.215 300	6.580 405	5.340 435	3.420 640	1.780 635	30,8	1.340

TABLEAU 7. — Longueur des éprouvettes : 20 cm.

Acier	$\frac{l}{2}$										δ_{cm}	F_u max
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
6% Tu (IM) { Φ { F/2	7.100 0	7.000 41	6.900 80	6.650 125	6.310 165	5.810 217	5.300 264	4.560 304	3.620 348	2.520 386	955 367	790
6% Cr (ACR) { Φ { F/2	7.360 0	7.310 39	7.210 76	7.000 125	6.700 172	6.225 229	5.710 269	5.035 323	4.030 373	2.915 408	1.325 408	878
10% Co (HaCo 5) { Φ { F/2	8.700 0	8.635 41	8.505 90	8.260 130	7.980 186	7.460 240	6.895 304	6.045 370	4.955 449	3.525 525	1.150 505	1.120
35% Co (717) { Φ { F/2	9.600 0	9.585 35	9.540 69	9.400 115	9.190 158	8.860 215	8.360 297	7.650 390	6.495 519	4.760 641	1.490 688	1.390
Ni-Al-Co H _{II} { Φ { F/2	7.640 0	7.620 17	7.600 34	7.575 56	7.540 83	7.435 132	7.245 198	6.845 270	6.100 380	4.800 548	2.280 636	1.315
Ni-Al-Co H _x { Φ { F/2	5.600 0	5.570 17	5.540 34	5.520 45	5.470 70	5.380 118	5.225 160	5.200 220	4.800 308	3.920 440	1.695 515	1.120

été tracées ; les courbes 1 correspondant à l'acier à 6 % de Tu, les courbes 2 à l'acier à 6 % de Cr, les courbes 3 et 4 aux aciers à 10 et 35 % de Co et les courbes 5 et 6 aux alliages au Ni-al-Co, à faible et forte teneur en Ni (Fig. 8 et 9).

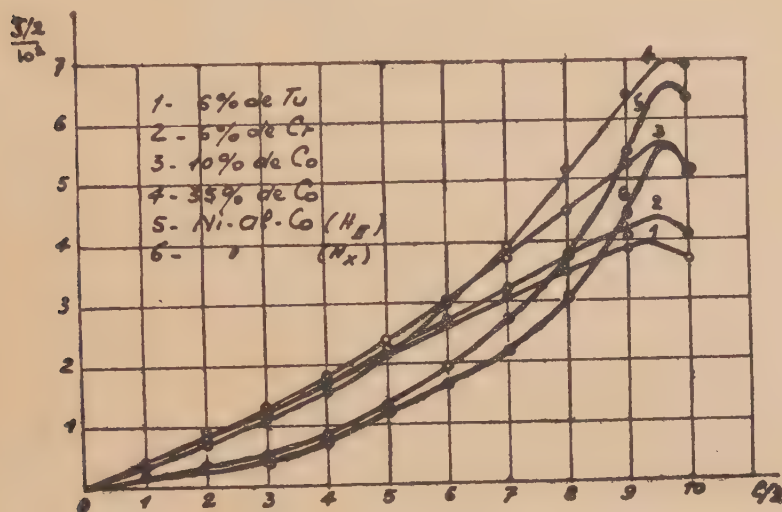


FIG. 9.

TABLEAU 8. — Longueur des éprouvettes : 15 cm.

Acier		$\frac{l}{2}$									δ_{cm}	F_u max.
		0	1	2	3	4	5	6	7	7,5		
6 % Tu (IM)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	4.950 0	4.890 48	4.720 96	4.445 138	3.950 193	3.390 242	2.560 290	1.360 326	850 314	14,0	652
6 % Cr (ACR)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	5.750 0	5.660 55	5.435 103	5.105 159	4.645 224	3.920 269	3.000 331	1.755 386	985 359	14,0	772
10 % Co (HaCo 5)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	7.500 0	7.300 65	7.155 124	6.800 197	6.160 276	5.300 352	4.080 440	2.420 518	1.360 496	14,0	1.036
35 % Co (717)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	9.150 0	9.090 59	8.900 131	8.535 204	7.955 297	7.110 405	5.560 560	3.160 690	1.920 660	14,2	1.400
Ni-Al-Co H_{II}	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	7.350 0	7.340 35	7.330 17,5	7.230 128	6.850 200	6.460 310	5.500 470	3.280 676	2.160 672	14,4	1.320
Ni-Al-Co H_X	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	5.455 0	5.450 28	5.385 55	5.350 83	5.290 136	4.985 235	4.300 380	2.900 555	1.970 560	14,4	1.140

TABLEAU 9. — Longueur des éprouvettes : 10 cm.

Acier		$\frac{l}{2}$							δ_{cm}	F_u max.
		0	1	2	3	4	4,5	5		
6 % Tu (IM)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	2.760 0	2.690 60,5	2.470 121	2.070 181,5	1.540 238		635 250	9,0	519
6 % Cr (ACR)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	3.400 0	3.340 66	3.050 149	2.600 224	1.830 291		740 306	9,0	646
10 % Co HaCo5	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	5.140 0	5.000 106	4.645 224	3.970 315	2.955 446		1.150 470	9,2	1.600
35 % Co (717)	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	7.600 0	7.400 131,5	6.955 272	6.000 475	4.280 655		1.990 732	9,2	1.600
Ni-Al-Co HII	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	7.150 0	7.090 79,5	6.850 198	6.240 334	4.930 545		1.970 720	9,4	1.480
Ni-Al-Co Hx	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \\ F/2 \end{array} \right.$	5.300 0	5.290 64,5	5.090 142	4.755 218	4.080 428		1.950 582	9,6	1.195

18. — L'examen de ces résultats montre que l'hypothèse de l'uniformité de l'aimantation sera d'autant plus exacte que l'aimant sera plus long, à égalité de section, ou ce qui revient au même mieux fermé, mieux armé. Elle le sera également d'autant plus que l'aimantation sera faible et la force coercitive élevée.

L'hypothèse de la variation linéaire du potentiel magnétique le long de l'aimant, sera d'autant plus exacte que la force magnétomotrice disponible sera plus faible.

La valeur calculée de la perméance aérienne vraie, déduite de nos mesures, est très peu différente de la valeur de la perméance aérienne apparente définie précédemment ; les variations de la perméance intérieure de l'aimant, pour un état d'aimantation déterminé, étant faibles dans les différents cas.

Aussi avons-nous établi un tableau donnant la valeur du facteur N' , très sensiblement égal au facteur démagnétisant et défini par la relation : $N' = \frac{4\pi}{P_a \frac{l}{s}}$. P_a étant le rapport du flux

à la force magnétomotrice disponible entre les pôles. Dans le tableau 10, nous avons fait également figurer les valeurs de ce

facteur pour des barreaux de 1 cm² de section circulaire et de longueurs égales à 5, 2,5, 1 et 0,5 cm ; en effet, dans la pratique, les aciers très coercitifs ont conduit à employer des aimants extrêmement courts.

TABLEAU 10.

Valeurs du facteur démagnétisant des barreaux cylindriques circulaires.

Acier		$\frac{l}{d}$							
		27,9	17,7	13,3	8,85	4,42	2,21	0,88	0,44
G ₁	{ 6 % Tu	0,0426	0,0700	0,119	0,236	0,648			
	{ 6 % Cr		0,0746	0,122	0,239	»			
G ₂	{ 10 % Co	0,0554	0,0806	0,124	0,242	»	1,640		
	{ 35 % Co	0,0640	0,0910	0,126	0,258	0,650	»		
G ₃	{ Ni-Al-Co		0,1082	0,150	0,260	0,735	1,650	5,25	7,0
	{ »		0,1256	0,175	0,300	0,875	2,020	»	»
Moyenne G ₁		0,0426	0,0723	0,120	0,237	0,648			
» G ₂		0,0597	0,0858	0,125	0,250	0,649	1,640		
» G ₃			0,1168	0,162	0,280	0,805	1,838	5,25	7,0
Moyenne générale		0,0501	0,0916	0,136	0,256	0,700	1,739	5,25	7,0

La variation de ce facteur N', avec la coercivité de l'acier paraît assez importante. Il augmente avec celle-ci, la distance des pôles étant plus grande ainsi que la longueur moyenne d'un tube de force du flux de fuite. Nous avons vu précédemment que la variation du facteur N était assez faible avec l'aimantation. Pour nous assurer qu'il en était *a fortiori* de même, pour le facteur N', nous avons déterminé sur des éprouvettes de 20 cm de longueur et 1 cm² de section circulaire, la valeur de la perméance aérienne vraie, à l'aide de la bobine-bague et du potentiomètre magnétique, pour diverses aimantations. Les éprouvettes étaient aimantées à saturation, puis après rupture du courant excitateur, nous mesurions Φ_{res} et F_u . Après inversion du courant, application d'un certain champ démagnétisant et nouvelle rupture, nous mesurions le nouveau flux de force et la nouvelle différence de potentiel magnétique entre les pôles. Les résultats obtenus étaient les suivants :

TABLEAU 11. — Variation du facteur démagnétisant avec l'aimantation.

Acier à 6 % Tu (IM)

Φ_{res}	F_u	P_a	N'
7.100	790	90,0	0,0700
5.100	586	87,0	0,07225
3.360	390	86,0	0,0730
1.390	190	73,0	0,0860

Acier à 10 % Co (Ha Co5)

Φ_{res}	F_u	P_a	N'
8.700	1.120	77,6	0,0806
5.860	742	79,0	0,0795
2.955	427	69,0	0,0910
1.690	268	63,0	0,100

Acier à 35 % Co (717)

Φ_{res}	F_u		N'
9.600	1.390	69,0	0,0910
6.755	930	72,5	0,0865
3.600	545	66,0	0,0950
2.000	334	60,0	0,1050

Alliage Ni-Al-Co (HII)

Φ_{res}	F_u	P_a	N'
7.640	1.315	58,0	0,1082
5.375	925	58,0	0,1082
4.255	745	57,0	0,1100
2.440	474	51,5	0,1220

Nous vérifions bien que le facteur N' varie également avec l'aimantation ; mais dans la limite d'emploi des aimants, cette variation est assez faible pour être négligée. On pourrait tenir compte de la variation avec la coercivité de l'acier, en prenant la moyenne des différents groupes (Tab. 10) ; on aurait alors une valeur suffisamment exacte de ce facteur.

19. — Il pouvait être intéressant de comparer les fantômes magnétiques de deux aciers différents, possédant à peu près la même aimantation. Nous rappellerons brièvement la méthode qui nous a permis de chiffrer la valeur de la perméance géométrique. Considérons le spectre magnétique dans une section méridienne et soient AB et CD, deux lignes de force assez voisines. Elles limitent (Fig. 10) un tube de force en forme de cloche entre la partie AC et le plan neutre MN. Soit $\alpha s = l$ sa longueur moyenne. Traçons une équipotentielle EF, ainsi que celle distante de dl . La réluctance de cette tranche est :

$$dR = \frac{dl}{s} = \frac{dl}{2\pi r \cdot E F}.$$

La réluctance totale étant la somme de tous les éléments analogues, nous pouvons l'obtenir de la manière suivante.

Nous diviserons l en n parties égales et nous calculerons $s = 2 \pi r \cdot EF$ pour chacune d'elles. Les valeurs de s ainsi obtenues nous donneront $\frac{1}{s}$ que nous porterons en ordonnée, l étant portée en abscisse. La quadrature de cette courbe nous donnera R

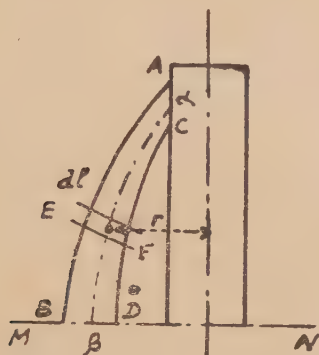


FIG. 10.

pour cette partie du champ. Répétant cette opération pour tous les tubes, nous en déduirons aisément R_A ou P_A . Cette valeur de la P_A , qui ne tient compte d'aucune hypothèse sur la variation du potentiel magnétique, qui varie de 0, à $\frac{Hl}{2}$ de la section

neutre au pôle, n'est bien entendu qu'une valeur géométrique. Pour déterminer le flux de fuite, il y aurait lieu de multiplier cette perméance par le facteur 0,5, la valeur obtenue étant celle de la perméance aérienne de l'aimant. Les 2 éprouvettes comparées à 6 % de T_u et au Ni-Al-Co (H_{II}) avaient une longueur de 20 cm et une section circulaire de 1 cm². Les aimantations respectives étaient 7.100 et 7.640 Gs ; les différences de perméance géométrique étaient donc dues, presque uniquement à la différence de coercivité. Les fantômes magnétiques ont été obtenus, sur papier sensible, à l'aide de fer finement divisé (fer réduit). La figure 11 indique une partie du tracé des tubes de force déduits de ces spectres.

Le calcul des perméances partielles a donné les résultats suivants :

Pour l'acier à 6 % de Tu.

$$p_1 = 1,340-1,710-1,800-1,475-1,100-1,060-0,875-0,860-0,802.$$

Pour l'acier au Ni-Al-Co :

$$p_2 = 0,985-0,670-0,530-0,423-0,394-0,371-0,304-0,288-0,284-0,254-0,326-0,281-0,240-0,170-0,178.$$

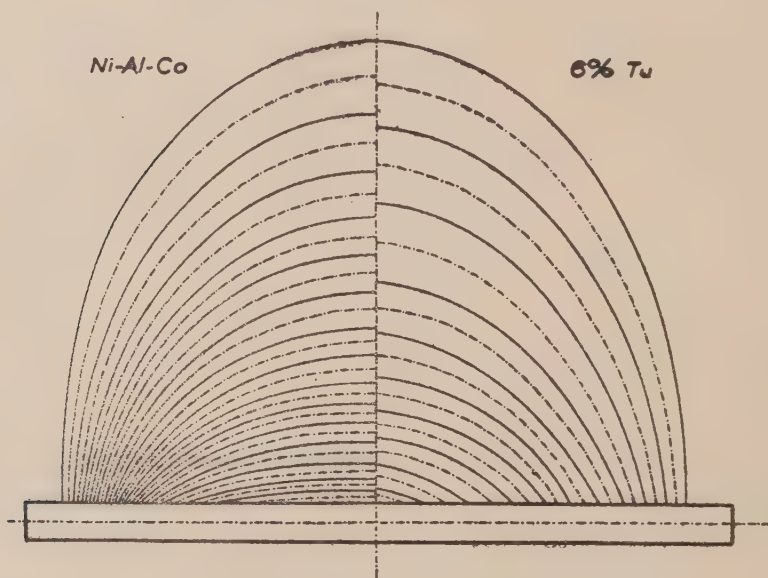


FIG. 11.

Les perméances géométriques étaient donc :

$$P_{1g} = 11,02 \text{ et } P_{2g} = 5,60 \text{ et leur rapport } K = \frac{5,60}{11,02} = 0,556.$$

Le rapport des facteurs démagnétisants déduits des mesures était $K = \frac{0,700}{0,1082} = 0,645$.

La différence provient, sans doute, des approximations du tracé et du calcul. Ces perméances sont bien entendu inférieures à la véritable valeur, toute la partie frontale du champ, en particulier, ayant été omise ; mais, à peu près de la même façon dans les deux cas.

La courbe de la figure 12 indique la variation du facteur démagnétisant N' en fonction de la coercivité de l'acier, pour un rapport $l/a = 17,7$.

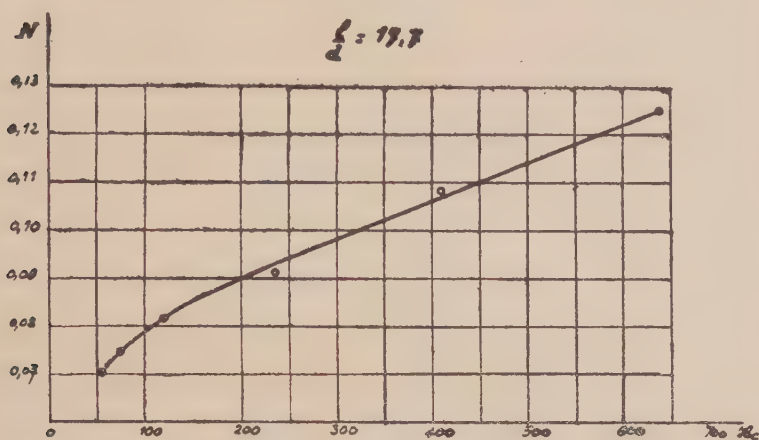


FIG. 12.

20. **Conclusion.** — En résumé, la perméance aérienne n'est pas une grandeur géométrique, déduite des dimensions et de la forme de l'aimant, mais dépend de la nature et des qualités magnétiques de l'acier. Elle varie légèrement avec l'aimantation, mais dans les limites d'application des aimants, elle peut être considérée comme indépendante de celle-ci. Elle varie davantage avec la coercivité de l'acier, mais en prenant les valeurs moyennes on ne sera conduit qu'à des erreurs assez faibles, de l'ordre de celles résultant des variations inévitables dans les caractéristiques de désaimantation, telles qu'elles existent toujours d'une pièce à une autre d'un même lot et, *a fortiori*, entre deux pièces de lots différents. On peut en effet vérifier que le tracé des droites de coefficient angulaire $P_a l/s$, déduit des valeurs moyennes de N' , donne des valeurs de l'aimantation résiduelle, assez peu différentes des valeurs réellement mesurées (Fig. 3).

Lorsqu'il s'agira de déterminer les dimensions d'un aimant, on choisira toujours l'aimant le plus économique ; les variations de la perméance aérienne, n'entraîneront pas alors à de graves erreurs, la variation de la fonction $(AH) = f(A)$ étant assez faible autour de son maximum.

Les aimants étant généralement de section constante, mais

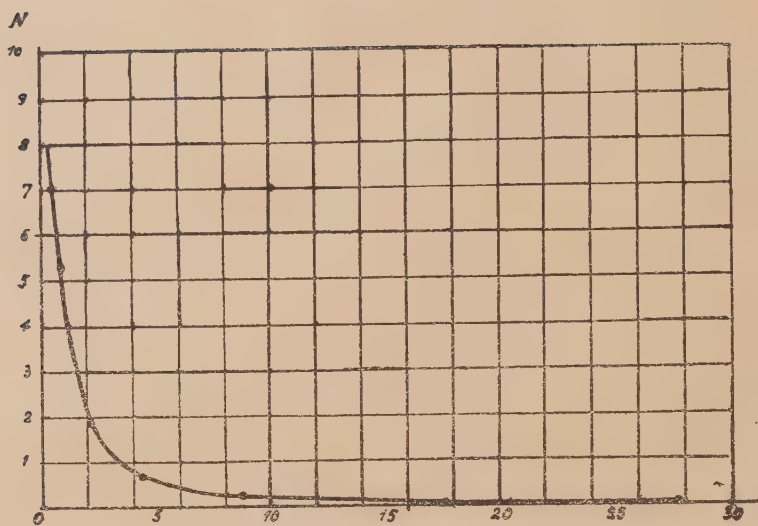


FIG. 13.

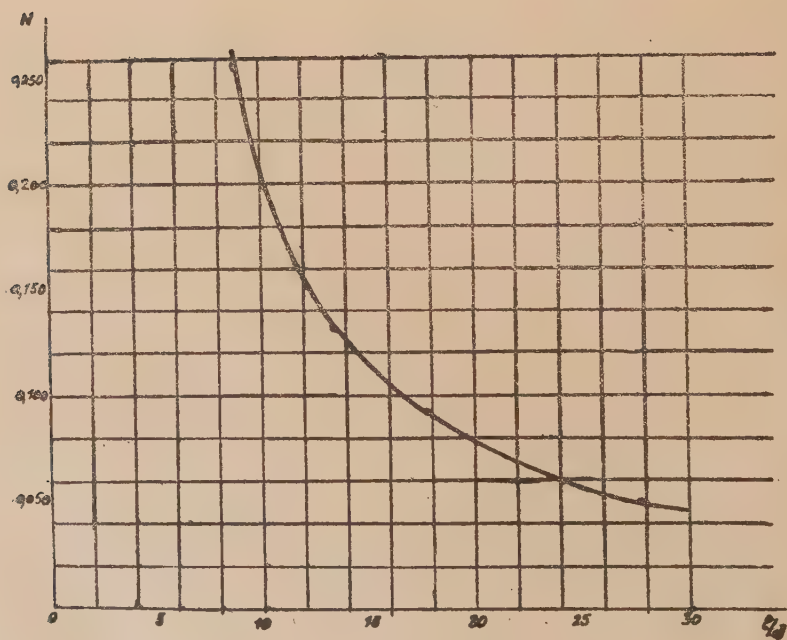


FIG. 14.

d'aimantation variable, les pôles ne seront pas aux extrémités. En application, la force magnétomotrice étant supposée localisée à ces extrémités, on pourrait croire qu'il suffit de prendre un point de fonctionnement, légèrement supérieur au point de coordonnées $(AH)_{\max}$. En fait, si la distance des pôles est plus faible que la longueur de l'aimant, la P_a vraie sera plus grande que la perméance aérienne calculée, avec l'hypothèse ci-dessus. Les deux effets se compenseront donc en partie, et la connaissance de la valeur moyenne de la perméance aérienne ou du facteur démagnétisant, donnera avec une approximation suffisante en pratique, la valeur probable de l'aimantation résiduelle et par conséquent de la force magnétomotrice disponible.

Les 2 courbes suivantes (Fig. 13 et 14) indiquent la variation de ce facteur moyen (tab. 10) en fonction du rapport l/d . La première relative aux valeurs de l/d comprises entre 0,5 et 30, la deuxième donnant à plus grande échelle les valeurs pour l/d compris entre 10 et 30.

On peut remarquer que ces valeurs sont très voisines de celles données par Du Bois-Reymond; celui ci ayant opéré vraisemblablement sur du fer de faible coercivité et l'aimantation pour les rapports l/d considérés dans cette étude étant faible. Les deux actions de l'aimantation et de la coercivité se compensent donc en partie.

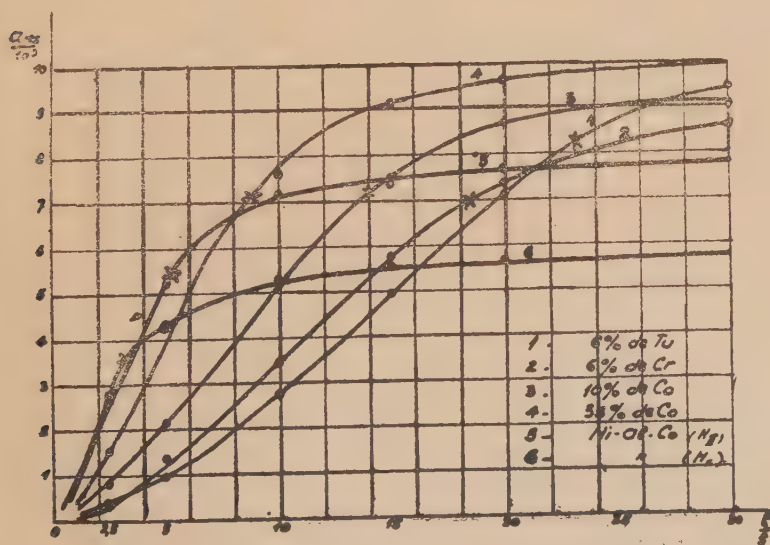


FIG. 15.

21. — Scott, ayant publié [17] des courbes indiquant la variation de l'aimantation résiduelle en fonction de la longueur, pour des barreaux cylindriques circulaires de section différente, pour des aciers de coercivité moyenne seulement, nous avons cru utile de faire figurer les résultats de nos expériences, ceux-ci s'étendant aux aciers modernes (Fig. 15).

Ces courbes admettent une asymptote horizontale, indiquant la limite de A_{res} quand l/s augmente. La tangente tracée de l'origine aux différentes courbes indique dans chaque cas les valeurs de l'aimantation résiduelle et du rapport l/s , pour lesquelles le rapport A_{res}/l ou A_{res}/V est maximum (Point indiqué par une croix). Ces points donnent bien les valeurs de A_{res} rendant le produit (AH) maximum.

CHAPITRE III

Le recul magnétique.

22. — Considérons un aimant fermé en court-circuit magnétique par une armature de réluctance négligeable, et entouré d'un bobinage magnétisant. Si après avoir aimanté à saturation, nous interrompons le courant, le point figuratif de l'aimantation se trouvera en A_0 . Après inversion du courant et application d'une force contre-magnétisante OM' , (Fig. 16) le point figuratif se trouvera en P' , par ex. Si nous continuons à faire croître le champ démagnétisant jusqu'à la valeur OM , le point figuratif continuera à descendre suivant la courbe A_0H_c et viendra en P .

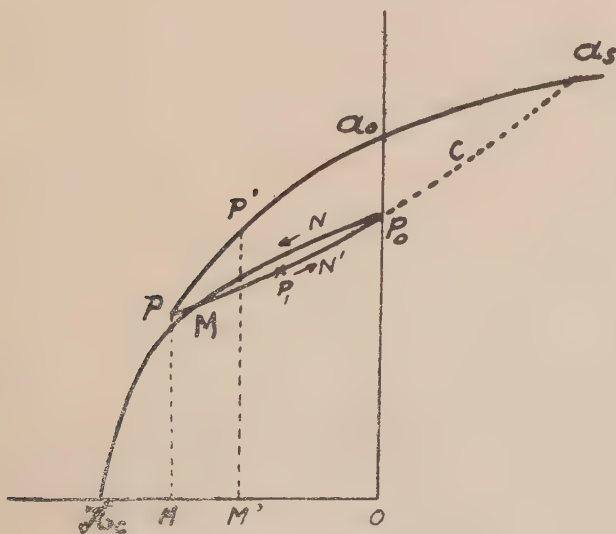


FIG. 16.

Si maintenant, nous le diminuons, le point P ne remontera pas sur la branche PA_0 , mais suivant une nouvelle courbe, pour venir en P_1 . Si l'on continue à diminuer le courant jusqu'à zéro, puis si on l'inverse et lui donne des valeurs croissantes, le point figuratif viendra en P_0 , puis continuera vers C, le long de cette branche subsidiaire et viendra rejoindre la caractéristique principale à la valeur A_s de saturation de l'acier. Cette boucle particulière comprise entre $A_s A_0 P$ et $PP_0 A_s$ est un cycle hystérique défini par des valeurs du champ $H = OM$ et $H = +\infty$.

Cette remontée sur une boucle particulière constitue le phénomène du *recul magnétique*, ainsi dénommé par Evershed [18].

En application pratique, les parties utiles des courbes sont limitées dans le quadrant $A_0, O, H-\infty$. Si donc, étant en P_0 (courant nul), on fait croître à nouveau celui-ci, le point figuratif viendra en arrière et la descente se fera sur la branche supérieure d'un cycle partiel, qui pratiquement, sera au maximum limité aux points P et P_0 . En fait les deux courbes se coupent en un point M assez voisin de P et, le courant continuant à croître, la branche supérieure du cycle de recul viendra rejoindre la courbe principale. Chaque cycle partiel sera donc déterminé par les limites même du champ démagnétisant.

23. — Ces cycles, en application, seront déterminés par l'armement plus ou moins notable d'un aimant isolé. Le fait de fermer plus ou moins le circuit par une armature donnera pour l'aimantation, un effet analogue à celui obtenu précédemment. L'armature substituée à un même volume d'air s'aimantera et sa perméabilité étant plus grande que celle de l'air, il concentrera sur lui-même une plus grande partie du flux. Il réagira donc à son tour dans le circuit aérien, et son effet sera absolument identique à celui d'une force remagnétisante. Cette force pourra d'ailleurs être produite par un autre aimant, et le résultat sera encore une augmentation du flux, une diminution de sensibilité à l'action des champs extérieurs, aux surcharges accidentelles qui peuvent se produire comme dans certains compteurs, enfin une diminution de la force magnéto-motrice disponible par suite du relèvement du flux.

Cet armement pourra d'ailleurs être plus ou moins complet ; un court-circuit parfait (armature sans réluctance, joints parfaits) ramènera le point figuratif sur l'axe OA_0 , un armement

partiel (léger entrefer) le laissera quelque part sur la ligne de recul issue du point défini par l'aimantation en circuit magnétique ouvert. Enfin, l'armement pourra être périodiquement variable comme dans les magnétos, et le point décrira une boucle auxiliaire fermée dont les limites extrêmes seront pratiquement H_{res} et $H = 0$. Notons en passant que pour la conservation des aimants, on utilise les propriétés du recul magnétique : aimants en fer à cheval accolés deux à deux, aimant droit placé dans un cylindre de fer doux. Comme l'indique M. R. V. Picou [19] « cette considération du recul magnétique est *capitale* pour le calcul des aimants utilisés avec armement, c'est-à-dire avec un circuit extérieur complexe (air et fer).

La connaissance de ces branches de courbes, sera donc aussi importante pour l'étude d'une combinaison de circuit complexe, que celle de la caractéristique principale et de la perméance aérienne de l'aimant isolé. »

24. Tracé expérimental des cycles partiels. — D'après ce qui a été dit précédemment au sujet du tracé de la caractéristique de désaimantation, nous pourrons utiliser le procédé de Rowland, les procédés de tracé cycliques n'étant pas rigoureux dans certains cas, en raison même du croisement des branches. Le montage précédemment décrit (Fig. 2) pourra donc être encore utilisé.

Il suffira étant en A_0 , d'amener l'état magnétique à une valeur A_r connue et d'établir successivement les champs H_1 , H_2 , H_3 ; on aura ainsi le tracé de la branche inférieure du cycle. Etablissant à nouveau les mêmes champs, en sens inverse, on obtiendra la branche supérieure (Fig. 17).

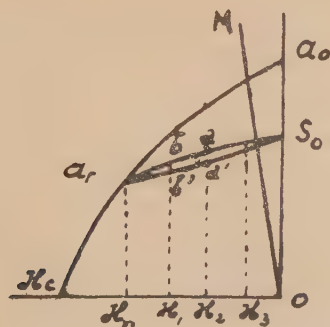


FIG. 17.

La sensibilité de notre galvanomètre était telle, que les points a et a' étaient nettement séparés. Ces cycles partiels, répétés plusieurs fois, étaient bien reproductibles, à condition de bien fixer l'état magnétique initial, en décrivant toujours la même

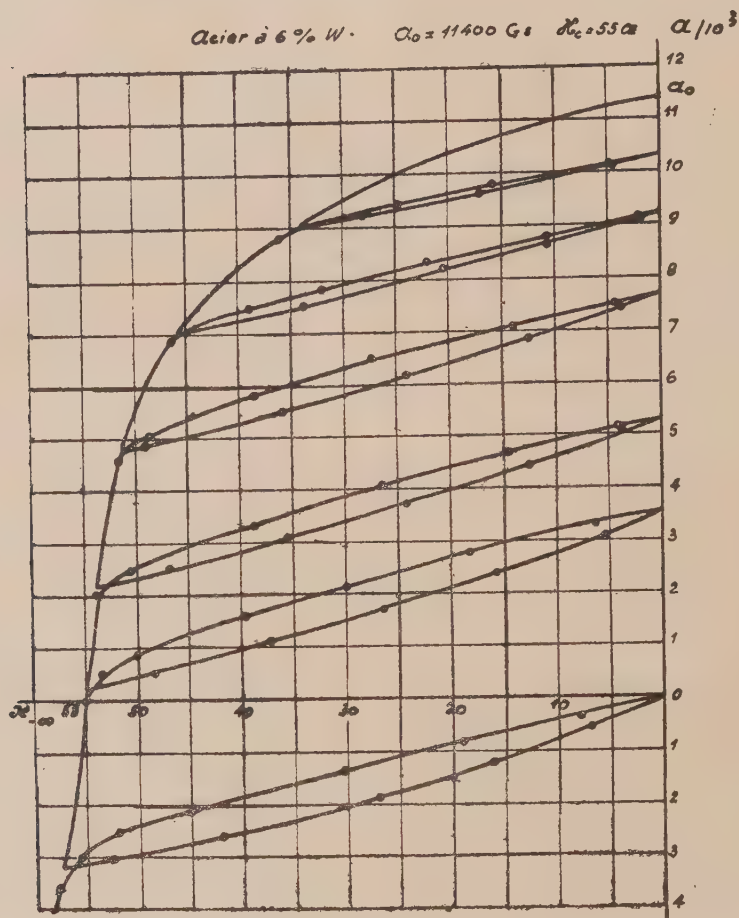


FIG. 18.

série d'opérations, de la même manière, en particulier 3 cycles entre $+A_s$ et $-A_s$, avant chaque série de mesures, selon un procédé conseillé par Ilievici [20]. Cette façon d'agir permet en effet d'être certain de la valeur A_r de l'aimantation correspondant à une force démagnétisante H_r .

Le circuit magnétique précédemment décrit comprenant des

Acier à 6% de Cr $\alpha_0 = 9850 \text{ Gs}$ $H_c = 76 \text{ Oe}$ $\alpha/10^3$

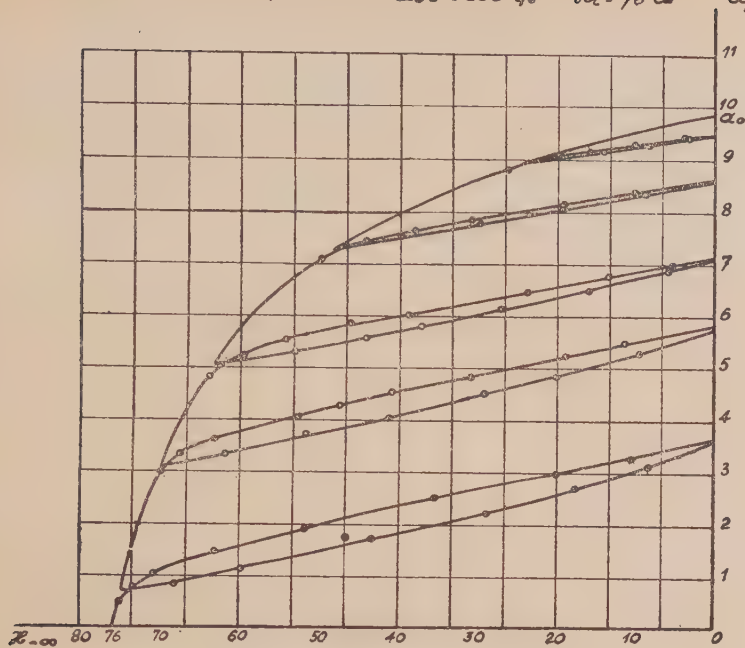


FIG. 19.

Acier à 4% de Co - $\alpha_0 = 10450 \text{ Gs}$ - $H_c = 121 \text{ Oe}$ $\alpha/10^3$

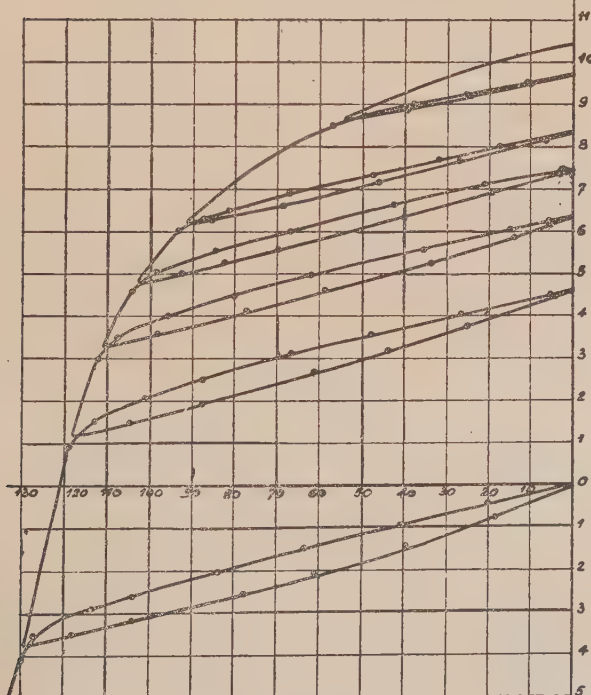


FIG. 20.

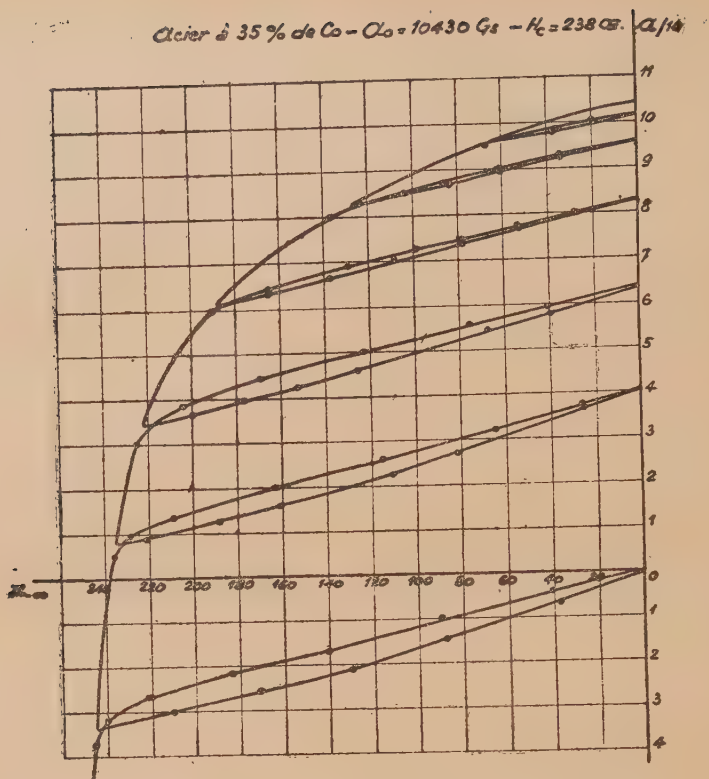


FIG. 21.

Alliage au Ni-Al-Co - $\alpha_0 = 7750 - H_c = 410$

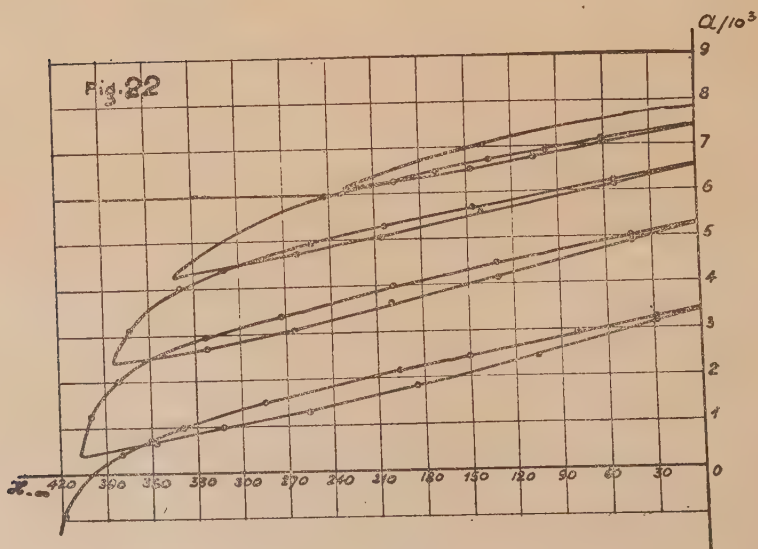


FIG. 22.

joints (circuit constitué par 2 barreaux identiques, réunis par deux culasses de fer doux), les points figuratifs des divers cycles partiels pour $H = 0$ se trouvaient limités à la droite OM, faisant avec l'axe OA_0 , un angle déterminé par la réluctance des joints. Pour en tenir compte, il suffisait donc, étant sur cette droite, d'inverser le courant et de pousser la valeur du champ jusqu'à la valeur H' , déterminée par l'intersection de la branche infé-

Alliage au Ni-Al-Co $\alpha_0 = 5850 \text{ Gs}$ $\beta_0 = 6400 \text{ Oe}$

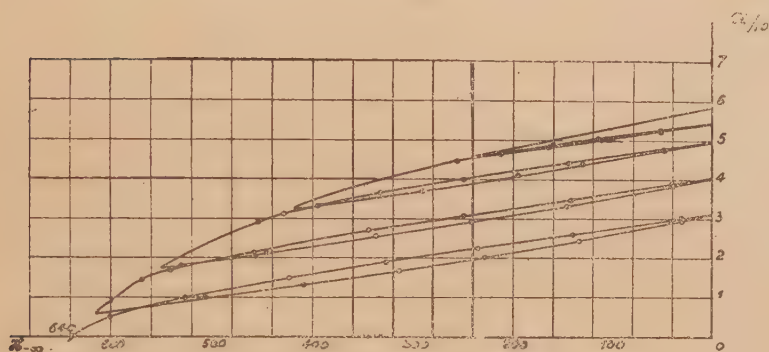


FIG. 23.

rieure de la boucle de recul et de la droite symétrique de OM par rapport à OA_0 . Cette valeur du champ était déterminée dans un essai préliminaire en dépassant la valeur présumée. Employant la méthode balistique et mesurant par conséquent des ΔB , nous retranchions les ΔH pour avoir le point exact de rencontre.

Les résultats obtenus par l'application de cette méthode et celle du « solénoïde-barreau », étant peu différents, nous avons préféré employer cette deuxième qui est plus expéditive, en raison du grand nombre de points à mesurer. Il est bien entendu, les cycles de recul étant limités dans cette méthode à la droite de coefficient angulaire $P_a \text{ l/s}$, que pour obtenir le cycle complet (sur la caractéristique d'acier), il faudra prolonger le tracé de la branche inférieure jusqu'au point de rencontre de celle-ci avec la droite symétrique de la première par rapport à OA_0 . Tout ce que nous avons dit au sujet des ΔB et des ΔA s'appliquera ici. La valeur de la perméance sera la valeur effectivement mesurée pour chaque type d'acier.

Les essais ont été effectués sur des barrettes cylindriques circulaires de 20 cm. de long et de 1 cm² de section.

Les courbes précédentes (Fig. 18 à 23) indiquent le tracé des différents cycles partiels ; nous y avons fait figurer, pour quelques aciers, le cycle de recul passant par l'origine, bien que celui-ci soit sans utilité pratique.

Chaque cycle a été mesuré trois fois.

25. — Les boucles partielles de recul étant relativement serrées, nous avons cherché un moyen permettant d'obtenir directement une impulsion du galvanomètre valant aa' (Fig. 17). Avec le montage normal, on amène l'état magnétique de l'aimant de A_s à A_o , puis après inversion du champ à une valeur A_r , choisie à l'avance. En diminuant le champ, on l'amène en a' . Cela étant, si l'on coupe et rétablit instantanément le courant, le point figuratif de l'aimantation décrit le trajet $A'S'_o a$. Le galvanomètre balistique reçoit deux impulsions successives très fortes $A'S'_o$ et $S'_o a$, de sens inverse. La différence aa' produit seule l'élongation, d'où la connaissance de la différence d'ordonnée, entre la courbe montante et descendante, pour une valeur déterminée du champ. On peut répéter la même opération, pour d'autres points, par exemple pour bb' ; mais en raison du croisement des boucles, il sera indispensable, afin de repartir toujours du même point A'_r , de décrire trois cycles complets entre les valeurs $+A_s$ et $-A_s$, avant de faire une nouvelle mesure. Nous avons utilisé pour ces opérations l'interrupteur à mercure I_m (Fig. 2). Cette méthode, applicable à des circuits fermés, a donné pour deux aimants en fer à cheval fermés par une armature de fer doux, des résultats un peu plus faibles que ceux obtenus sur les aimants droits, par la méthode solénoïde-barreau ; sans doute en raison même de la valeur de la réluctance des joints, qu'il est impossible de compenser, et un peu en raison de la faiblesse des déviations [21] [24]. Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux suivants :

TABLEAU 12. — Acier à 6 % de Tu ($A_0 = 10.550 - H_c = 60,8$).

$H_r = 60,8 - A_r = 0$		$H_r = 53,5 - A_r = 5.000$		$H_r = 34,2 - A_r = 8.850$	
H	aa'	H	aa	H	aa'
48,8	370	39,0	290	34,1	16
39,0	416	29,2	266	24,4	53
29,3	488	19,5	272	14,6	72
19,5	422	9,75	175	4,86	29
9,75	249	4,86	95		
4,86	135				

TABLEAU 13. — Acier à 10 % de Co ($A_0 = 9.600 - H_c = 130$).

$H_r = 130, A_r = 0$		$H_r = 104, A_r = 5.000$		$H_r = 67, A_r = 8.000$	
H	aa'	H	aa'	H	aa'
94,8	470	82,7	375	51,3	82
70,0	502	61,8	412	42,0	104
40,3	365	42,0	350	31,2	77
14,9	200	15,0	192	14,7	53

26. — Les déviations du galvanomètre étant assez faibles, pour les cycles de recul partiels non fermés, nous avons utilisé un autre mode opératoire, permettant de lever cette difficulté, tout en conservant le montage normal et ses accessoires.

A la lecture d'une *impulsion balistique*, nous avons substitué une lecture de *déviatiou fixe*, du même galvanomètre ; cette lecture donnant le résultat de l'accumulation d'une série d'impulsions.

Le principe est le suivant : on amène toujours le point figuratif de A_0 en A_r à l'aide du rhéostat Rh_1 (Fig. 24), puis de A_r en a' avec Rh_2 . En ce point, une coupure de courant, suivie de son rétablissement immédiat produit, comme nous venons de le voir, dans le circuit d'épreuve, l'émission d'une quantité $+q$, proportionnelle à $aa' = \Delta A$.

Si arrivé en a , on shunte la partie du rhéostat Rh_2 qui produit la magnétisation H_r H_2 (Fig. 17), et si on le rétablit immédiatement en circuit, le point figuratif parcourra le trajet $a A_r a'$, et

donnera naissance à une quantité d'électricité — q . Si, dans l'intervalle on a inversé les fils qui relient la bobine d'épreuve b au galvanomètre, l'impulsion correspondra encore à $+q$ comme la précédente. Faisons succéder rapidement cette série d'opérations $2f$ fois par seconde, le galvanomètre prendra une dévia-

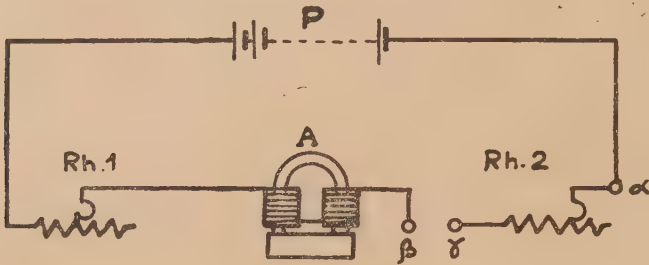
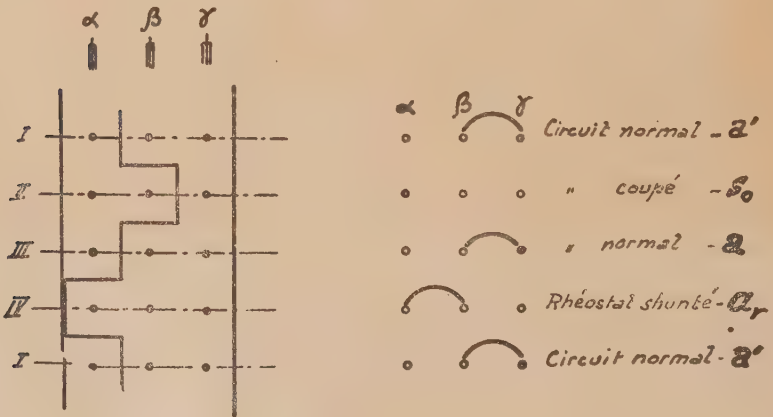


FIG. 24.

tion fixe correspondant à un courant $i = 2fq$. Ceci est réalisable à l'aide d'un double commutateur tournant à f tours par seconde. Une partie réalise l'action principale, l'autre inverse les conducteurs du galvanomètre. Le schéma du commutateur principal est figuré figure 25 et l'inversion des fils du galvanomètre figure 26.



L'inversion des fils du galvanomètre doit se produire aux instants I et III

FIG. 25.

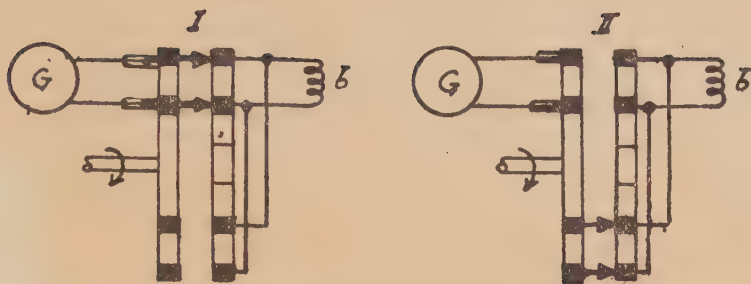


FIG. 26.

27. Description de l'appareil. — Le commutateur principal était constitué par un tube de laiton de 30 mm. de diamètre, et découpé suivant le schéma de la figure 25. Il était encastré dans un cylindre d'ébonite, lui servant de support et constituant les parties isolées du commutateur. Ce cylindre était fixé sur un arbre d'acier de 8 mm. de diamètre, supporté à ses deux extrémités par deux petits paliers. Les trois balais amenant le courant des points α , β , γ étaient en bronze phosphoreux. Ils avaient 5 cm. de haut, 15 mm. de large et 0,4 mm. d'épaisseur. Ils étaient distants de 3 mm. et fixés sur un petit socle en bakélite.

Le commutateur auxiliaire comprenait un support rectangulaire rigide en bakélite S, maintenu par une équerre de laiton au socle de l'appareil. Il supportait deux portions de circonférences concentriques, séparées par un coin isolant de bakélite C, venant affleurer au niveau des bagues. Celles-ci avaient 5 mm. de largeur, 3 mm. de hauteur et étaient distantes de 3 à 4 mm. Les portions de la bague intérieure étaient réunies aux deux autres portions opposées de la bague supérieure. Les fils venant de la bobine d'épreuve b communiquaient avec les deux bagues.

Le galvanomètre balistique était mis en communication avec la bobine d'épreuve par l'intermédiaire de deux petits balais en charbon m , réglables, venant frotter contre deux bagues concentriques B, identiques aux premières mais non tronquées. Ces bagues, au moyen de deux petits frotteurs en bronze phosphoreux étaient en relation avec la bobine b . Elles étaient portées par un disque de bakélite D fixé sur l'arbre, tournant par conséquent à la même vitesse que le commutateur principal.

Le calage relatif du commutateur principal et des deux demi-bagues fixes était tel que l'inversion du galvanomètre se produisait aux instants I et III. L'ensemble était entraîné par poulie et courroie, par un petit moteur à courant continu à vitesse réglable.

Nous remercions M. Huetz d'avoir bien voulu utiliser ses talents de mécanicien de précision à la réalisation de cet appareil. La figure 27 donne une idée de l'ensemble.

28. — L'emploi de cette méthode, rapide et industrielle, ne donne malheureusement que les valeurs correspondant à un cycle limite, très voisin de celui issu du point A_r , mais qui peut déjà en différer sensiblement pour les faibles aimantations, en

raison même du croisement des branches de recul. Ce procédé étant précisément intéressant pour les cycles de faible ouverture, le point de croisement des branches sera alors très voisin de A_r , et la déviation du galvanomètre se stabilisera presque instantanément. L'erreur que l'on commettra sur l'ouverture du cycle sera de ce fait très faible.

Les essais ont été effectués sur l'aimant en fer à cheval à 6 % de Tu, ayant servi aux mesures précédentes. Les dimensions étaient les suivantes :

Longueur développée : 14,7 cm., section : $1,28 \text{ cm}^2 = 0,8 \times 1,6$, distance entre axe des branches : 3,15 cm. L'enroulement magnétisant entourait bien la partie droite des branches, la bobine d'épreuve de 10 spires seulement était placée dans la section neutre.

Le moteur entraînait le système tournant à 1.200 t/m ; l'amplification était donc de 40. Pour une variation de 10 G_s, l'élongation du galvanomètre était de 9,6 mm.

Les résultats obtenus par cette méthode sont résumés dans le tableau suivant :

TABLEAU 14. — Acier à 6 % de Tu ($A_0 = 10.550$ — $H_c = 60,8$).

$H_r = 46,1 - A_r = 6.900$		$H_r = 33,2 - A_r = 8.800$		$H_r = 22,1 - A_r = 9625$	
H	aa'	H	aa'	H	aa'
46,1	0	33,2	0		
42,2	160	29,3	30	20,8	60
28,4	210	23,8	110	17,9	85
22,2	160	15,8	55	11,1	42
17,6	125	11,1	30	7,1	20

29. — Dans toutes les méthodes expérimentées jusqu'ici, nous n'avons obtenu les effets de recul que par variation du courant magnétisant. Toute cause magnétisante produira un effet analogue et en particulier, celui-ci pourra être obtenu au moyen d'une armature de fer doux, ou au moyen d'un aimant identique. Considérons donc un aimant, en fer à cheval par exemple, à circuit magnétique ouvert. Aimantons-le à saturation et coupons le courant excitateur ; nous pourrions mesurer son flux résiduel et sa différence de potentiel magnétique et de là en dé-

de réaliser un armement partiel au moyen d'une armature approchée ou éloignée de l'aimant et n'agissant sur lui, qu'au travers d'une pièce non magnétique, appliquée aux extrémités de l'aimant. La force magnétomotrice correspondant aux divers armements partiels sera déterminée par un essai au potentiomètre magnétique placé entre les pôles. La perméance des joints sera déterminée de la même façon, l'armature étant au collage. Celle-ci approchée ou éloignée périodiquement de l'aimant, reconstituera un fonctionnement analogue à celui d'une magnéto, et permettra de connaître la droite relative au cycle limite $P'S''$.

30. — Avant ces essais, nous stabiliserons l'aimantation contre les chocs, après aimantation à saturation, par l'application d'une vingtaine de coups d'un maillet de bois, plus forts que ceux pouvant se produire pendant les expériences ; ensuite nous déterminerons la droite $P'S''$ et la perte d'aimantation correspondant au déplacement du point P ; enfin, nous vérifierons qu'un point de la boucle de recul tombe bien au voisinage de cette ligne. Les essais ont été effectués sur deux aimants identiques, en fer à cheval, décrits au paragraphe 28. La mesure des flux et des variations de flux se faisait à l'aide d'une bobine-bague de 20 spires, rectangulaire, placée au cintre de l'aimant, celle des forces magnétomotrices à l'aide d'un potentiomètre magnétique de 200 spires. θ et ψ étant les déviations du galvanomètre correspondant aux $\Delta\Phi$ et ΔF , nous avons : $\Delta\Phi = 26,8\theta$ et $\Delta F = 6,90\psi$.

1° Détermination du point de rémanence P des deux aimants :

Aimant n° 1	$A_{\text{res}} = 6.360$	$H_{\text{res}} = 48,0$	$Pa\ l/s = 128$
» n° 2	» = 6.280	» = 48,7	» = 129

Les pôles se trouvaient dans les deux cas à 6 mm. des extrémités.

L'application des formules de Cramp et Miss Calderwood [22], pour le calcul des aimants en fer à cheval donnait : $Pa\ l/s = 132$.

2° Variation de la force magnétomotrice par déplacement de l'armature : Afin de simplifier l'écriture, les notations suivantes signifieront :

A. M. : Nous appliquons brusquement l'armature aux extrémités de l'aimant.

A. R. : Nous arrachons l'armature.

P. E. : Nous enlevons le potentiomètre magnétique, l'armature étant au collage.

P. O. : Nous enlevons le potentiomètre magnétique, l'aimant étant à circuit ouvert.

Nous n'indiquerons les valeurs absolues des diverses grandeurs mesurées, que lorsque cela sera nécessaire. Les chiffres figurés dans les tableaux suivants correspondent aux déviations lues sur l'échelle lumineuse. Le tableau 16 correspond à une série de 12 armements consécutifs, avec mesure des ΔF ; après le 12^e armement, nous avons mesuré les valeurs du flux résiduel, de l'aimantation résiduelle, de la force magnétomotrice utile et du coefficient $P_a \frac{l}{s}$. Ces valeurs sont les suivantes :

$$\Phi_{\text{res}} = 8.050 \text{ Gs} \text{ — } A_{\text{res}} = 6.280 \text{ G}_s \text{ — } F_u = 687 \text{ Gb} \text{ — } P_a l/s = 129,5.$$

TABEAU 16.

Nombre d'armements	PO	AM	PE	AR	θ_{res}
0	102				305
1		88	14	88	
2		»		»	
3		»	12	»	
4		»		91	
5		89	10,5	89	
6		88		90	
7		89	10	»	
8		»		»	
9		»		»	
10		»		89	
11		89,5		90	
12		89	10	89	
Après le 12 ^e	99,5				300

L'examen de ces chiffres montre que :

a) l'aimantation résiduelle diminue lorsque le nombre d'armements augmente ;

b) les points de la courbe montante sont placés au-dessous de ceux appartenant à la courbe descendante ;

c) la perméance aérienne, aux erreurs expérimentales près reste constante.

En résumé, le point figuratif de l'aimantation descend le long de la droite de coefficient angulaire P_a l/s . Nous chercherons sa limite en faisant une nouvelle série d'armements en mesurant cette fois les $\Delta\Phi$.

3° *Variation de l'aimantation résiduelle par déplacement de l'armature* : Le tableau 17 résume les résultats relatifs à une nouvelle série d'armements.

TABLEAU 17.

Nombre d'armements	Po	AM	PE	AR	θ_{res}
13		52		52	
14		51		»	
15		51,5		»	
16		»		»	
17		52,5		»	
18		52,5		»	
Après le 23 ^e ar	99				299,6

Après le 23^e armement les valeurs des grandeurs mesurées étaient :

$$\Phi_{res} = 8.020 \quad A_{res} = 6.260 \quad F_u = 683 \quad P_a \text{ } l/s = 133 \quad \Delta A = 1.090 ;$$

et après une série de 27 armements, sans mesures :

$$\Phi_{res} = 8.015 \quad A_{res} = 6.255 \quad H_{res} = 46,5 \quad \Delta A = 1.095 \text{ (point s')}. \quad$$

Une nouvelle série de 50 armements était sans influence ; la valeur de l'aimantation était stabilisée à 6.255 G_s et la diminution en % de A_{res} était donc de 1,6. En tenant compte de la légère courbure de la branche inférieure du cycle de recul et de la réluctance des points, nous obtenions, dans l'hypothèse d'un court-circuit parfait : $\Delta A = 1.350 \text{ } G_s$. L'augmentation en % d'aimantation par recul magnétique total était de 22 ; cette valeur étant inférieure à la valeur obtenue par variation du courant magnétisant et la méthode du tore (29 %). Cette différence tient sans

doute à ce que nous n'opérons pas peut-être avec une rapidité suffisante, d'autre part à la faiblesse des déviations du galvanomètre balistique.

On sait, en effet, que la théorie de cet appareil suppose que le cadre reste immobile pendant toute la durée de l'impulsion, et que la durée de la décharge peut intervenir quand la déviation totale est petite [23]. Nous aurions pu évidemment porter le nombre de spires de la bobine d'épreuve à 100 ou 200, pour obvier dans une certaine mesure à cette action perturbatrice ; les résultats de ces essais étant surtout à considérer en valeur relative, nous n'avons pas cru nécessaire de les reprendre dans de nouvelles conditions.

Notons encore que, dans cette façon de procéder, des pôles conséquents apparaissent aux extrémités et au cintre de l'aimant, rendant la répartition de l'aimantation dans les diverses sections assez irrégulière.

4° *Armements partiels* : L'entrefer variable a été réalisé au moyen de feuilles de papier d'écolier, collées entre elles.

Les résultats sont consignés dans les tableaux 16, 17, 18, 19 et 20, et les points correspondants sur la figure 29.

TABLEAU 16. — 1 couche de papier. TABLEAU 17. — 2 couches de papier.

AM (ψ)	PE	AR (ψ)	Δa (θ)
81	18	82	47,2

AM (ψ)	PE	AR (ψ)	Δa (θ)
73,5	25,6	73,5	43,2

TABLEAU 18. — 4 couches de papier.

TABLEAU 19. — 8 couches de papier.

AM (ψ)	PE	AR (ψ)	Δa (θ)
64	36	66	37,3

AM (ψ)	PE	AR	Δa (θ)
51	46,5	52,5	29,2

TABLEAU 20. — 16 couches de papier.

AM ψ	PE	AR ψ	Δa (θ)
37,3	62,6	38,3	20,8



FIG. 29.

A la fin des essais les déviations relatives au flux résiduel et à la force magnétomotrice étaient : $\theta_{\text{res}} = 298,6$ $\psi_{\text{res}} = 99,0$.

5° *Armement par aimant identique* : Partant du point figuratif P', ou tout au moins d'un point très voisin, nous avons réalisé une série de 10 armements à l'aide d'un aimant. Après le 10^e, nous avons trouvé : $\theta_{\text{res}} = 285$ $\psi_{\text{res}} = 95$.

Une nouvelle série de 40 armements donnait : $\theta_{\text{res}} = 284,7$ $\psi_{\text{res}} = 94,7$.

Les valeurs de l'aimantation résiduelle, du champ résiduel et du coefficient Pa l/s étaient :

$$A_{\text{res}} = 5947 \text{ Gs} \quad H_{\text{res}} = 44,3 \text{ Oe} \quad \text{Pa} \frac{l}{s} = 134.$$

Une autre série de 50 armements ne produisait aucun effet : l'aimantation résiduelle était donc descendue à 5.947 Gs. La perte d'aimantation résiduelle était de 4,9 % et l'augmentation de celle-ci après fermeture sur un aimant identique était (point s') de 23 %.

Des pôles conséquents apparaissent également sur les aimants.

La fermeture du circuit magnétique était moins parfaite que celle constituée par une armature de fer doux ; les perméances aériennes des aimants, mis ainsi en court-circuit, produisant des dérivations, des fuites de flux. Pratiquement, on peut admettre les résultats comme identiques.

34. Conclusion. Coefficient de recul. — L'examen des cycles de recul (Fig. 18 à 23) montre que :

1° Ces boucles se ferment exactement, et sont d'autant plus aplaties que la coercivité de l'acier est plus grande et l'aimantation résiduelle de l'aimant plus élevée.

2° Elles diffèrent un peu de la droite joignant les valeurs extrêmes de A.

3° L'énergie volumique dégradée dans chaque boucle :

$$\frac{W}{V} = \int_{I_1}^{I_0} H dI$$

et représentée par la surface de celle-ci, au facteur $\frac{1}{4\pi}$ près est faible.

La pratique industrielle, qui confond ces boucles avec la droite joignant les valeurs extrêmes de l'aimantation, est suffisamment justifiée. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, au sujet de la perméance aérienne, deux aimants ayant même composition chimique et subissant des traitements réputés identiques, sont physiquement différents ; les traitements thermiques ayant d'ailleurs une plus grande influence que la composition chimique [25].

On pourra donc définir un coefficient de recul ρ égal au coefficient angulaire de chaque ligne de recul, et donné par la relation :

$$\rho = \frac{\Delta A}{\Delta H}.$$

Les tableaux suivants (21 à 26) résument les résultats déduits de nos expériences. La surface des divers cycles de recul a été mesurée au planimètre, mais nous aurions pu, avec une précision très suffisante assimiler chaque boucle, à une ellipse aplatie

TABLEAU 21. — Acier à 6 % de Tu ($A_0 = 11.400 \text{ Gs} - H_c = 55 \text{ Oe}$).

H_{res}	A	A_0	Ecart max. ab	Ecart max. entre branches	$\frac{W}{V} \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	
54,7	275	3.550	225	600	2.030	59,8
54,0	2.125	5.325	175	400	1.370	59,3
51,5	4.775	7.675	140	400	1.270	56,4
46,0	7.000	9.200	75	225	575	47,9
35,2	9.000	10.325	50	115	260	37,0

TABLEAU 22. — Acier à 6 % de Cr ($A_0 = 9.850 \text{ Gs} - H_c = 76 \text{ Oe}$).

H_{res}	A_1	A_0	Ecart max. ab	Ecart max. entre branches	$\frac{W}{V} \frac{\text{ergs}}{\text{m}}$	ρ
74,7	700	3.575	200	450	2.600	38,4
69,7	3.110	5.740	175	425	2.300	35,0
63,5	5.030	7.080	75	225	1.030	32,4
47,6	7.300	8.600	15	50	170	27,3
22,0	8.965	9.450	10	50	80	22,1

TABLEAU 23. — Acier à 10 % de Co ($A_0 = 10.450 \text{ Gs} - H_c = 121 \text{ Oe}$).

H_{res}	A_1	A_0	Ecart max. ab	Ecart max. entre branches	$\frac{W}{V} \frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	ρ
118,0	1.200	4.575	175	575	3.720	28,6
111,2	3.250	6.375	150	500	3.180	27,9
103,5	4.750	7.450	135	375	2.035	26,0
91,5	6.200	8.325	90	225	975	23,3
56,0	8.600	9.700	15	50	100	19,6

TABLEAU 24. — Acier à 35 % de Co ($A_0 = 10.430$ Gs $H_c = 238$ Oe).

H_{res}	A_1		Ecart max. ab	Ecart max. entre branches	$\frac{W}{V}$ $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	ρ
235,5	750	4.050	190	450	5.180	14,1
222,2	3.425	6.350	115	375	4.285	13,4
188,3	6.100	8.300	70	160	1.390	11,7
127,5	8.200	9.600	10	60	640	11,0
62,5	9.600	10.150	0	20	40	8,8

TABLEAU 25. — Acier au Ni-Al-Co ($A_0 = 7.750$ Gs $H_c = 410$ Oe).

H_{res}	A_1	A_0	Ecart max. ab	Ecart max. entre branches	$\frac{W}{V}$ $\frac{\text{ergs}}{\text{m}}$	ρ
407	400	3.410	200	425	7.550	7,40
382	2.400	5.250	150	400	7.225	7,46
340	4.280	6.580	80	235	3.060	6,77
225	6.150	7.400	60	150	1.360	5,55

TABLEAU 26. — Acier au Ni-Al-Co ($A_0 = 5.850$ Gs $H_c = 640$ Oe).

H_{res}	A_1	A_0	Ecart max. ab	Ecart max. entre branches	$\frac{W}{V}$ $\frac{\text{ergs}}{\text{cm}^3}$	ρ
617	600	3.100	150	250	6.800	4,05
549	1.750	3.990	100	200	4.400	4,09
412	3.315	4.925	75	125	1.950	3,91
244	4.505	5.415	30	50	500	3,73

On peut déduire de ces tableaux les valeurs du coefficient ρ pour diverses aimantations et différents aciers (Tab. 27).

Ces valeurs de ρ pourront être prises comme des moyennes très suffisantes, pour des aciers de même nuance, bien que ceux-ci soient légèrement différents selon leur histoire. Il est remarquable, que si l'on figure les valeurs de ρ pour une même aimantation résiduelle A_{res} , pour toutes les sortes d'acier, en fonction de H_c par exemple, les points correspondants se placent sur une même courbe d'allure hyperbolique. Il se manifeste ainsi une

sorte de parenté entre ces aciers de composition très différente et de traitements de stabilisation également différents, de même dans la représentation de ρ en fonction de $\frac{A_o}{H_c}$, pour une même aimantation résiduelle, les points correspondants se placent sur une même droite.

TABLEAU 27. — Facteur de recul de divers aciers à aimant en fonction de l'aimantation résiduelle.

Nature de l'acier	H_c	A_o	$\frac{A_o}{H_c}$	$\frac{A_{res}}{10^3} = 10$	8	6	4	2	0
			H_c						
6 % de Tu	55	11.400	207,0	$\rho = 30,0$	42,6	52,5	58,0	59,4	59,9
6 % de Cr.....	76	9.850	129,5		25,7	30,2	33,6	37,0	38,7
10 % de Co	121	10.450	86,2		20,7	24,0	26,8	28,3	29,0
35 % de Co	238	10.430	43,8		10,5	11,8	13,2	14,0	14,2
Ni-Al-Co (20 % Ni)...	410	7.750	18,9			5,6	7,0	7,5	7,4
» (30 % Ni)...	640	5.850	9,15				3,8	4,1	4,0

Cette propriété peut s'expliquer par le fait que tous les aciers et alliages à aimant suivent de près la loi de Lamont d'après laquelle « la perméabilité est proportionnelle à la différence entre la valeur de saturation de l'induction et la valeur au point considéré », et d'autant mieux qu'ils sont meilleurs au point de vue magnétique. De plus les courbes de recul se rejoignant à la valeur A_s de saturation de l'acier, il est naturel de penser que le coefficient ρ , fonction évidemment de H_c , le sera également de A_s donc de A_o .

Le graphique de la figure 30 indique la variation de ρ en fonction de A_o/H_c , pour des aimantations échelonnées de 2 en 2 kilogauss. Il peut être utilisé pour les valeurs intermédiaires. Enfin, l'abaque de la figure 31 permet connaissant H_c , A_o et A_{res} de déterminer le coefficient de recul correspondant. Nous y avons adjoint la valeur de A_{resm} , correspondant au point de coordonnées $(AH)_{max}$, et telle que $A_{resm}/A_o = 0,69$.

On peut remarquer encore, que dans l'hypothèse de réduction du cycle de recul à la droite joignant les valeurs extrêmes de A , la perméance intérieure, définie en chaque point par le rapport $\Delta\Phi/\Delta F$ est pratiquement indépendante du degré d'armement.

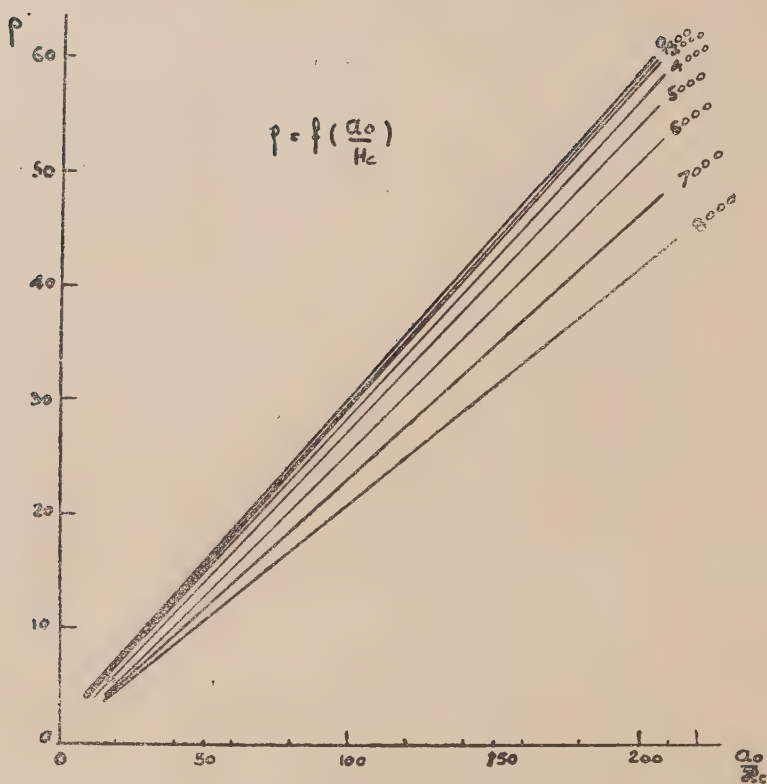


FIG. 30.

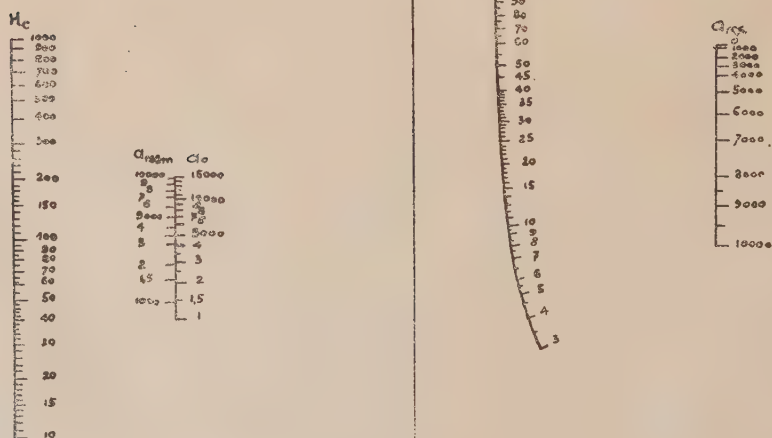


FIG. 31.

Ce rapport, égal au produit du facteur même de recul ρ par la constante $\frac{s}{l}$, ne dépendant que des dimensions de l'aimant, est en effet constant, le long d'une ligne de recul. Il est dès lors possible de calculer le travail nécessité par le déplacement de l'armature. L'aimant étant à circuit ouvert, l'énergie emmagasinée dans le champ est :

$$W = \frac{1}{8\pi} F_1 \Phi_1$$

F_1 et Φ_1 étant la force magnétomotrice utile et le flux résiduel correspondant au point de départ P_1 .

Si nous approchons l'armature, nous réaimantons l'aimant ; le point figuratif remonte le long de la branche de recul issue de P_1 et vient en un point P_2 par exemple.

Soient F_2 et Φ_2 les nouvelles valeurs de F et de Φ .

L'énergie du champ a diminué de :

$$\frac{1}{8\pi} (F_1 - F_2) (\Phi_1 - \Phi_2)$$

Or $dW = F dx$ (Formule de la loi d'attraction à distance)

et
$$dW = \frac{1}{8\pi} d(F\Phi) = \frac{1}{8\pi} (F d\Phi + \Phi dF)$$

Mais : $F = H_c l = cte$; donc $dF = 0$ et $\Phi = FP$.

Nous en tirons : $F d\Phi = F^2 dP$ et finalement :

$$F = -\frac{dW}{dx} = \frac{1}{8\pi} F^2 \frac{dP}{dx}$$

P est la perméance de tout le circuit, air, fer et aimant ; celle du fer d'armature peut être considérée comme infinie, celle de l'aimant comme constante, la seule variation notable est celle de l'air. La formule donnant la variation de l'énergie devient donc :

$$dW = \frac{1}{8\pi} F^2 dP_a.$$

35. Températures de forgeage. — Tous les aciers ayant fait l'objet de nos mesures ont subi un revenu de 2 h. à 100° C, sauf les alliages au Ni - Al - Co, pour lesquels cela n'était pas nécessaire en raison de leur recuit à température élevée ; mais des

essais effectués sur des aimants en fer à cheval et en barres rectilignes, nous avaient amené à penser que les températures de forgeage, pouvaient avoir quelque influence sur les caractéristiques de désaimantation, et par conséquent sur le facteur de recul.

Le barreau droit n'a en effet subi aucun chauffage entre le laminage et la trempe, tandis que l'aimant en fer à cheval a été réchauffé. Son histoire est donc différente et cela suffit à produire des différences.

Pour l'acier à 6 % de Tu, les Etablissements Jacob Holtzer ont bien voulu nous fournir deux lots d'éprouvettes, marquées IM, de 20 cm. de longueur et 1 cm² de section circulaire.

Le premier lot comprenait 4 barreaux, numérotés de 1 à 4, et pris dans la même barre laminée à chaud, après un chauffage de 20 min. à 1190° C.

Le deuxième lot comprenait 4 barreaux numérotés de 5 à 9 et traités d'une manière identique. Les deux barres subissaient un recuit de 800° C pendant 30 min., et le refroidissement s'effectuait lentement sur le sol de l'atelier. Après découpage, les différentes pièces subissaient les traitements thermiques suivants :

Barreau n° 1	Chauffage 5 min. à	900° C
» 2	»	»
» 4	»	1.000° C
» 5	»	1.150° C
» 6	»	1.200° C

Les pièces 3-7-8-9 ne subissaient pas de chauffage.

Toutes étaient ensuite rectifiées à $s = 1$ cm², chauffées à 870°C pendant 5 min. et trempées dans de l'huile à 46° C.

Les résultats obtenus, en ce qui concerne les caractéristiques de désaimantation sont consignés dans le tableau 28 et sur la figure 32. Pour l'acier à 35 % de cobalt, les 4 éprouvettes expédiées par les forges étaient prélevées dans la même barre laminée à chaud. Elles étaient de dimensions identiques aux précédentes, et numérotées de A à D.

Elles subissaient toutes un recuit à 850° C suivi d'un refroidissement lent à l'air, puis une trempe préliminaire à 1.200° C, accompagné d'un revenu de 30 min. à 750° C et enfin une trempe à 975° C dans de l'huile à 31° C.

Entre le recuit et la trempe préliminaire, le barreau A subis-

sait un chauffage de 30 min. à 1.000° C, le barreau B, un chauffage de 30 min. à 1.150° C. Les éprouvettes C et D ne subissaient

TABEAU 28.

No	Traitement	H _c	A ₀	A _{res}	(AH) _{max} =
2	Chauffage 5 min. à 900° C	62,8	10.950	7.000	290 × 10 ³ = 7.100 × 40,8
3	Pas de chauffage.	62,9	11.000	7.050	288 × 10 ³ = 7.050 × 40,5
4	Chauffage 5 min. à 1.000° C	62,3	10.850	6.850	268 × 10 ³ = 6.750 × 39,6
5	» 1.150° C	66,2	10.800	7 250	306 × 10 ³ = 7 100 × 43,0
6	» 1.200° C	67,2	10 860	7 300	315 × 10 ³ = 7 125 × 44,2

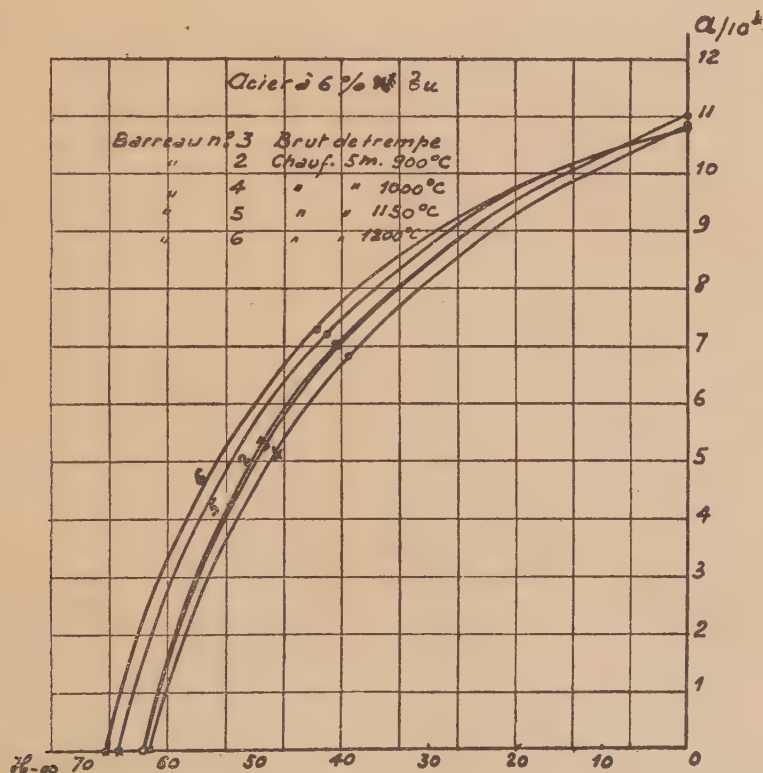


FIG. 32.

pas de chauffage. Après aimantation à saturation, nous obtenons les caractéristiques suivantes (Tab. 29, Fig. 33) :

TABLEAU 29.

N°	Traitement	H _c	A ₀	A _{res}	(AH) _{max} =
A	Chauffage 30 min. à 1.000° C...	258,0	10.200	9.400	$1.143 \times 10^3 = 6.725 \times 170$
B	» 1.150° C...	252,3	10.280	9.455	$1.110 \times 10^3 = 6.700 \times 174$
C	Pas de chauffage.....	264,0	10.000	9.310	$1.204 \times 10^3 = 6.760 \times 178$

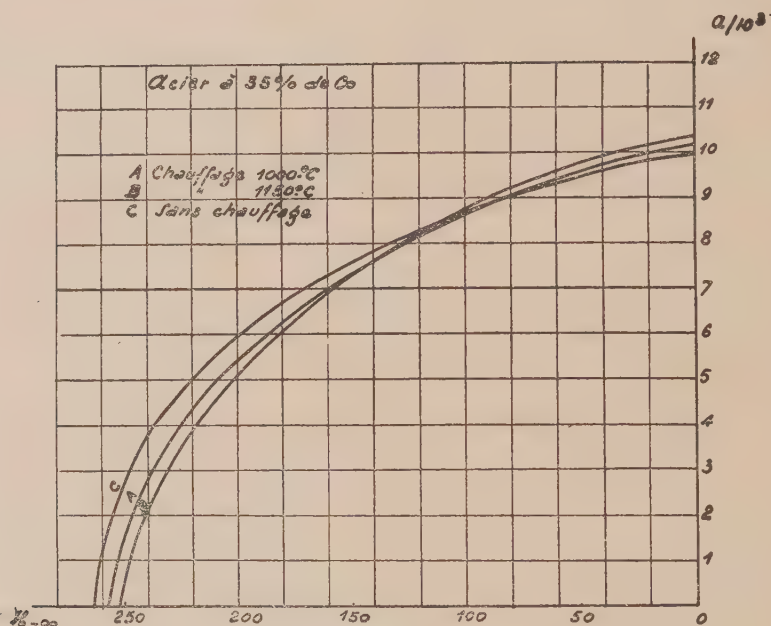


FIG. 33.

L'examen des résultats montre une influence certaine des températures de forgeage sur les caractéristiques ; mais elle est néanmoins assez faible pour ne pas entraîner de différences notables dans la valeur du coefficient de recul. Evershed attribuerait cette influence [18] à une décarburation des couches extérieures de la barre. Il se produirait alors, une sorte de tube en métal plus doux qui fermerait partiellement le circuit magnétique.

On peut remarquer que si certaines températures dégradent l'acier, d'autres au contraire le régénèrent (1.150 et 1.200° C

pour l'acier à 6 % de Tu). L'explication devrait sans doute être cherchée dans la nature des carbures produits par le chauffage.

36. Conclusions générales. — Les méthodes industrielles de calcul des appareils à aimant sont fondées sur deux hypothèses simplificatrices qui sont :

1^o La perméance aérienne est une grandeur géométrique, fonction seulement de la forme et des dimensions relatives de la pièce aimantée, et indépendante de la composition et des traitements de stabilisation de l'alliage magnétique.

2^o Les cycles de recul sont assez fermés pour que l'on puisse les confondre avec la droite formant leur grand axe.

On savait que ni l'une ni l'autre de ces hypothèses n'était exacte, c'est afin de préciser leur degré d'approximation que nous avons entrepris la présente étude.

Après un premier chapitre où l'on définit les grandeurs et notations employées, les méthodes utilisées, ainsi que les diverses caractéristiques des aciers et alliages employés industriellement (acier au Tu, au Cr, au Co, au Ni-Al) vient l'étude proprement dite.

Dans le second chapitre qui comprend l'étude de la perméance aérienne, nous avons établi un tableau donnant les valeurs du facteur démagnétisant pour différents alliages et pour des rap-

ports $\frac{l}{d}$ compris entre 30 et 0,5 (l'emploi des alliages modernes conduisant à des rapports $\frac{l}{d}$ très faibles).

L'étude de la variation de l'aimantation le long d'aimants cylindriques ayant tous la même section circulaire, mais de nuances et de longueurs différentes, a mis en évidence la non uniformité de l'aimantation et l'influence de la nature de l'acier sur cette variation.

Elle serait d'autant plus faible, pour un même $\frac{l}{d}$ que la coercivité de l'acier serait plus grande. L'étude de la variation du potentiel magnétique absolu dans les mêmes conditions, a montré que celle-ci se rapprochait d'autant plus de la variation linéaire que la force magnétomotrice disponible était plus faible.

La perméance aérienne n'est donc pas une grandeur géométrique, mais dépend de la nature et des qualités magnétiques de

l'acier. Elle varie légèrement avec l'aimantation, et ceci d'autant mieux que la coercivité de l'acier est plus faible et le rapport $\frac{l}{d}$ plus petit. Pratiquement, dans les limites d'application $4.000 \text{ G}_s < 4\pi I < 8.000 \text{ G}_s$, la perméance aérienne peut être considérée comme indépendante de l'aimantation pour des valeurs de l/d supérieures à 5. Elle varie davantage avec la coercivité de l'acier, mais en prenant les valeurs moyennes, on ne sera conduit qu'à des erreurs assez faibles, de l'ordre de celles résultant des variations inévitables dans les caractéristiques de désaimantation, telles qu'elles existent toujours d'une pièce à une autre d'un même lot, ou, *a fortiori*, entre deux pièces de lots différents. Dans le troisième chapitre, se rapportant au recul magnétique, nous avons tracé les différents cycles de recul des divers aciers à aimant. L'ouverture maximum de ces cycles est assez faible, ainsi que la surface comprise entre les branches montante et descendante. Elle est d'autant plus petite que l'aimantation est plus élevée et l'acier plus coercitif. On a donc pu définir un coefficient de recul, égal au coefficient angulaire de chaque ligne de recul, l'écart des branches étant en moyenne de 300 à 400 G_s , pour les valeurs de l'aimantation résiduelle correspondant, pour les divers aciers, au point d'économie maximum. Nous avons donné les valeurs de ce coefficient pour des aimantations échelonnées de 2 en 2 KGs, et pour des coercivités comprises entre 50 et 700 CE .

Il est remarquable de constater que si l'on figure les valeurs de ce coefficient en fonction du rapport $4\pi I_0/H_c$, pour une aimantation résiduelle déterminée, tous les points se placent sur une même droite.

Il existe donc une parenté entre ces aciers de composition très différente et de traitements de stabilisation également différents ; cette propriété pouvant s'expliquer par le fait que tous les aciers et alliages à aimant suivent de près la loi de Lamont.

Nous avons établi un abaque permettant, quand on connaît l'aimantation rémanente et la force coercitive, de déterminer rapidement la valeur de ce facteur de recul, pour une valeur quelconque de l'aimantation résiduelle.

Enfin, parmi les causes pouvant influencer sur la valeur de ce coefficient, on peut citer l'action des revenus en vue du vieillissement artificiel et celle des températures de forgeage. La pre-

mière influence ayant fait l'objet de nombreuses recherches, nous n'avons envisagé que la seconde. Dans les limites d'application, l'action des températures de forgeage est assez faible, certaines tendant à dégrader légèrement l'acier, tandis que d'autres températures plus élevées le régénèrent.

En résumé, les deux hypothèses admises dans le calcul des appareils à aimant, bien qu'inexactes, peuvent être considérées comme commodes et suffisamment approchées, en raison même de la complexité des phénomènes magnétiques, de la nature des alliages et de l'histoire même des aimants.

BIBLIOGRAPHIE

1. WEBB (C. E.). — Récents développements des matériaux magnétiques. *I. E. E.*, mars 1938, p. 304.
2. BARUS (C.) et STROUHAL (V.). — *Bulletin U. S. A. Geological Survey*, 1885, n° 14.
3. CURIE (M^{me} P.). — *Bulletin Soc. Encouragement*, 1893.
- 4-8-18. S. EVERSLED. — Aimants permanents en théorie et en pratique. *I. E. E.*, août 1925, p. 789, 725, 792 et (7) *I. E. E. V.* 58-1920, p. 780.
5. WEBB (C. E.) et FORD (L. H.). — Méthode précise de mesure des aimants en fer à cheval. *I. E. E.*, janvier 1930.
6. WURSCHMIDT. — *Zeit. für Physik*, 16, 1923.
7. SANFORD (L. R.). — Bureau of Standard Sc. Papers, n° 567, 10 août 1927.
- 9-17. SCOTT (K. L.). — Aciers magnétiques et aimants. *El. Eng.*, mai 1932, p. 320.
10. BOIS-REYMOND (DU). — Circuit magnétique, p. 39 et 45.
- 11-12-13-14. JOUAUST. — Le Ferromagnétisme, p. 135.
- 15-16. CAMPBELL (A.) et DYE (C. W.). — Les Potentiomètres magnétiques. *I. E. E.*, 1916, p. 36.
- 19-22. PICOU (R. V.). — Les Aimants. Calcul et applications, 1936, p. 87-88 et p. 64.
20. ILIOVICI (A.). — Dispositif simple et correct pour le tracé d'un cycle d'hystérésis par points. *Bulletin de la Soc. franç. des Electriciens*, nov. 1936.
- 21-23. DUPOUY (G.). — Sur l'utilisation du galv. balistique comme appareil de zéro. *C. R. Ac. Sc.*, nov. 1936, p. 987.
24. WEISS (M. P.). — *Journal de Physique*, 3^e série, 3, 1895, p. 420.
25. WHIFFIN (A. C.). — Effet des variations de température sur le champ des aimants permanents. *I. E. E.*, déc. 1937, p. 727-739.
- LACOSTE-TAYAN (H.). — Sur les cycles de recul des aciers à aimant. *C. R. A. Sc.*, mai 1937, p. 1556 et juillet 1937, p. 122.
— Sur la perméance aérienne des aimants permanents. *C. R. A. Sc.*, janv. 1938, p. 103.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Le Fer Electrolytique.

Vu et approuvé :

Paris, le 14 juin 1939.

Le Doyen de la Faculté des Sciences

CH. MAURAIN.

Vu

et Permis d'imprimer :
Le Recteur de l'Académie
de Paris,

G. ROUSSY.

